



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

Fakultät für Maschinenbau

DISSERTATION

**Charakterisierung des mechanischen Verformungsverhaltens von
weichelastischen Schaumstoffen unter impulsartigen
sportspezifischen Belastungen**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

eingereicht von: Karoline Brückner

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Stephan Odenwald

Oktober 2012

Bibliografische Angaben

Fakultät:	Maschinenbau	
Verfasser:	Karoline Brückner	Matrikel: 229094
Titel:	Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von weichelastischen Schaumstoffen unter impulsartigen sportspezifischen Belastungen	
Art der Arbeit:	Dissertation	
Umfang:	103 Seiten, 136 Literaturquellen, 92 Abbildungen, 2 Tabellen	
Betreuer:	Prof. Dr.-Ing. S. Odenwald	
Abgabedatum:	17/10/12	
Schlagwörter:	Spannungs-Verformungs-Verhalten, Ethylen/Vinylacetat, zelluläre Struktur, Zelldurchmesser, Matrixmaterial, Verformungsgeschwindigkeit, komprimierte Luft, Geschlossenzelligkeit	

Kurzreferat

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein physikalisches Modell für weichelastische EVA-Schaumstoffe entwickelt, das das mechanische Verformungsverhalten (Spannungs-Verformungs-Kurve) bei der Interaktion zwischen Sportler und Sportgerät am Beispiel eines Laufschuhs anwendungsgerecht – d.h. bei hoher Verformung und Belastungsgeschwindigkeit – kennzeichnet. Im Stand der Technik werden als Einflussfaktoren auf das mechanische Verformungsverhalten von Weichschäumen die Parameter Schaumdichte, Zellgröße bzw. Zelldurchmesser, Schaumhärte und Verformungsgeschwindigkeit ermittelt. Diese werden für die vorliegenden vier Versuchsmaterialien analysiert, wobei die letzten zwei Parameter im Modell Berücksichtigung finden.

Das Modell setzt sich aus einem Matrix- und einem Gasphasenanteil zusammen. Der Matrixphasenanteil wird experimentell bei der jeweiligen Verformungsgeschwindigkeit bestimmt, wohingegen der Gasphasenanteil der in den Zellen komprimierten Luft auf einem physikalischen Zusammenhang beruht und anhand der gemessenen Schaumhärte und des Atmosphärendrucks bei der jeweiligen Verformung berechnet wird. Die Voraussetzungen für die Verwendung des Modells, zu denen inkompressible Matrixphase, Geschlossenzelligkeit und keine Querausdehnung des Schaums zählen, werden vorab umfangreich geprüft. Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass das gewählte Modell eine gute Übereinstimmung mit den experimentell bestimmten Ergebnissen erzielt. Dies wird anhand der Mittelwertes der Differenz von experimentell ermittelten zu modellierten Daten bestimmt, für den ein Wert von 7 % berechnet wird.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik.....	2
2.1	Schaumstoffe.....	2
2.2	Weichschäume als Dämpfungsmaterial in Sportanwendungen.....	3
2.2.1	Ethylen/Vinylacetat (EVA).....	3
2.2.2	Polyurethan (PUR).....	4
2.2.3	Weitere Schaummaterialien.....	4
2.3	Prüfung von Weichschaummaterialien in Sportanwendungen.....	5
2.4	Mechanisches Verformungsverhalten von Schäumen (σ - ϵ -Kurve).....	7
2.5	Modelle zur Beschreibung der σ - ϵ -Kurve polymerer Schaumstoffe.....	9
2.5.1	Stochastisch-theoretische Modelle.....	9
2.5.1.1	Modelle von Rush.....	9
2.5.1.2	Makroskopische Modelle.....	10
2.5.2	Tetraikaedraeder-Modelle (numerische Modelle).....	10
2.5.3	Mikromechanische Modelle.....	11
2.5.3.1	Mikromechanisches Modell nach Gent und Thomas.....	11
2.5.3.2	Einheitszellen-Modell nach Gibson und Ashby.....	11
2.5.4	Physikalische Modelle.....	13
2.5.4.1	Luftfeder-Modell.....	13
2.5.4.2	Element-Modell nach Fuss.....	17
2.5.5	Zusammenfassung und Bewertung der Modellvorstellungen.....	18
2.5.5.1	Stochastisch-theoretische Modelle.....	18
2.5.5.2	Tetraikaedraeder-Modelle (Numerische Modelle).....	18
2.5.5.3	Mikromechanische Modelle.....	18
2.5.5.4	Physikalische Modelle.....	19
2.5.5.5	Modellansatz.....	19
2.6	Einflüsse auf die σ - ϵ -Kurve des Schaums.....	20
2.6.1	Einflüsse der Gasphase.....	20
2.6.1.1	Einfluss der Dichte.....	20
2.6.1.2	Einfluss der Schaumhärte.....	22
2.6.1.3	Einflüsse der zellulären Struktur.....	23
	Zellgröße bzw. Zelldurchmesser (Zellwanddicke, Zellanzahl).....	24
	Zelligkeit und Querausdehnung (Poissonzahl).....	30
	Strukturveränderungen.....	33
2.6.1.4	Gasphase: Zusammenfassung und Diskussion	36
2.6.2	Einflüsse der Matrixphase.....	38
2.6.2.1	Einfluss von chemischem Aufbau und Morphologie.....	39
2.6.2.2	Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit.....	41
2.6.2.3	Matrixphase: Zusammenfassung und Diskussion	43
3	Präzisierung der Aufgabenstellung.....	45
3.1	Motivation.....	45
3.2	Ziel der Arbeit.....	46
4	Methodik.....	47
4.1	Ermittlung der σ - ϵ -Daten der Schaummaterialien.....	47
4.2	Versuchsmaterialien.....	48
4.3	Ableitung eines Modells auf Basis der Einflüsse aus dem Stand der Technik.....	49
4.4	Methoden zur Bestimmung der Einflussparameter.....	49

4.4.1	Parameterbestimmung der Gasphase.....	49
4.4.1.1	Analyse der Dichte.....	49
4.4.1.2	Analyse der Schaumhärte.....	50
4.4.1.3	Analysen der zellulären Struktur.....	50
	Matrixverteilung, Zelldurchmesser und Zellanzahl.....	50
	Zelligkeit und Querausdehnung.....	53
	Verformungsmechanismen im Schaum.....	55
4.4.2	Parameterbestimmung der Matrixphase.....	55
4.4.2.1	Analyse des chemischen Aufbaus und der Morphologie der Matrix.....	55
4.4.2.2	Untersuchung der Verformungsgeschwindigkeitseinflusses.....	56
5	Ergebnisse.....	58
5.1	σ - ϵ -Verlauf der untersuchten Schaummaterialien.....	58
5.2	Einflüsse auf das mechanische Verformungsverhalten der Schaummaterialien.....	59
5.2.1	Gasphase.....	59
5.2.1.1	Unterschiedliche Schaumdichten.....	59
5.2.1.2	Unterschiede in der Schaumhärte.....	60
5.2.1.3	Zelluläre Struktur.....	61
	Matrixverteilung unterschiedlich; Zelldurchmesser bzw. Zellanzahl nicht eindeutig messbar.....	61
	Geschlossenzelligkeit und Poissonzahl von Null.....	64
	Strukturveränderungen: Verformung in einzelnen Schichten.....	67
5.2.2	Matrixphase.....	68
5.2.2.1	σ - ϵ -Kurve des massiven Elastomers.....	68
5.2.2.2	Chemischer Aufbau und Morphologie der Schäume identisch.....	69
5.2.2.3	Verformungsgeschwindigkeit: Unterschiede bei Schaum & Matrix.....	70
6	Diskussion.....	73
6.1	Geringfügiger Unterschied der σ - ϵ -Kurven der Schäume.....	73
6.2	Einflüsse auf das mechanische Verformungsverhalten der Schaummaterialien.....	73
6.2.1	Gasphase.....	73
6.2.1.1	Schaumdichte als Einflussparameter.....	73
6.2.1.2	Schaumhärte als Einflussparameter.....	73
6.2.1.3	Zelluläre Struktur.....	74
	Weitere Methoden zur eindeutigen Bestimmung von Zelldurchmesser und Zellanzahl.....	74
	Geschlossenzelligkeit und Poissonzahl von Null als Voraussetzungen für das Modell.....	75
	Inhomogene Strukturveränderung in Schichten vertikal zur Belastung.....	76
6.2.2	Matrixphase.....	77
6.2.2.1	EVA-Elastomer als Matrixphase der untersuchten Schäume.....	77
6.2.2.2	Geschwindigkeitsabhängigkeit von Matrixphase und Schaum.....	77
6.3	Modell.....	77
6.3.1	Voraussetzungen des Modells.....	77
6.3.2	Modellgenerierung – Basismodell plus Einflussfaktoren.....	78
6.3.2.1	Einflussfaktoren der Gasphase.....	78
	Dichte als Einflussfaktor im Modell.....	78
	Härte mit eingeschränktem Zusammenhang zur Dichte.....	79
	Zelldurchmesser und Zellanzahl ohne Berücksichtigung im Modell.....	79
6.3.2.2	Einflussfaktoren der Matrixphase.....	80
	Identische Elastomermatrix für alle vier Schäume.....	80

Verformungsgeschwindigkeitsabhängigkeit des Elastomers.....	80
Bestimmung von Faktor M.....	81
6.3.3 Experimentelle vs. modellierte Daten.....	81
6.3.3.1 Vergleich bei unterschiedlicher Härte.....	83
6.3.3.2 Vergleich bei unterschiedlicher Verformungsgeschwindigkeit.....	84
6.3.3.3 Qualität des Modells.....	86
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	87
8 Verzeichnisse.....	89
8.1 Literaturverzeichnis.....	89
8.2 Abbildungsverzeichnis.....	97
9 Danksagung.....	101
10 Selbstständigkeitserklärung nach §8.....	102
11 Curriculum Vitae.....	103

1 Einleitung

Das Motto von Henri Didon „citius, altius, fortius“ - lateinisch für „schneller, höher, weiter“ gilt als Devise in der Welt des Sports, in der immer neue Rekorde aufgestellt werden. Um diese Höchstleistungen zu vollbringen, ist allerdings nicht nur körperliche Fitness erforderlich. Insbesondere im Hochleistungssport rücken dabei ausgefeilte Technologien und hochwertige Werkstoffe immer mehr in den Mittelpunkt. Eines der im Profisport gefragtesten Materialien ist der Kunststoff, da er hervorragende Materialeigenschaften wie geringes Gewicht bei gleichzeitig guter Stabilität, Festigkeit, Steifigkeit und Elastizität bietet. In fast allen Sportgeräten findet Kunststoff seine Anwendung wie beispielsweise in Skiern, Surfboards, Fahrrädern, Bällen, Turngeräten und Sportschuhen (Hülsmann & Knebel, 2009).

Die Kunststoffe, die im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen, sind die weichelastischen Schaumstoffe. Diese werden im Sport in zahlreichen Anwendungen zur Dämpfung von Stößen und Schwingungen eingesetzt, angefangen von der Turnmatte über verschiedenste Schutzausrüstungen bis hin zur Zwischensohle von Laufschuhen (Abbildung 1). Die Anforderungen an die Kunststoffe in diesen Anwendungen sind besonders komplex, da die auftretende Belastung durch einen impulsartigen Stoß gekennzeichnet ist. Beim Laufen beispielsweise tritt innerhalb von wenigen Millisekunden eine Kraft von rund dem zweifachen Körpergewicht im Fersenbereich eines Läufers auf (Milani & Hennig, 2002). Die Güte des Stoßdämpfungsvermögens des Werkstoffes, das insbesondere durch die Spannungs-Verformungs-Kurve beschrieben wird, spielt dabei eine entscheidende Rolle, um die auf den Sportler einwirkende Belastung auf ein physiologisch akzeptables Niveau reduzieren zu können. Auf Grund des im sportspezifischen Bereich komplexen Anspruchs an den Kunststoff und den damit verbundenen Anforderungen an eine adäquate Produktentwicklung, steht die Erarbeitung eines Material-Modells zur Beschreibung dieses Spannungs-Verformungs-Verhaltens basierend auf den Eigenschaften von Schaumstruktur und Gerüstmaterial im Mittelpunkt dieser Arbeit.



Abbildung 1: Impulsartige Stoßbelastungen auf ein Sportgerät: Schlag auf Protektoren beim Boxen, Landung einer Turnerin auf einer Weichbodenmatte und beim Auftreffen des Rückfußes eines Läufers auf den Laufschuh (N24 Gesellschaft für Nachrichten und Zeitgeschehen mbH, 2008; Füten, A., 2009; Stenglein, 2009)

2 Stand der Technik

2.1 Schaumstoffe

Schäume sind Werkstoffe mit über die gesamte Masse verteilten Hohlräumen (DIN 7726). Ein Hohlraum bzw. eine Pore ist von Zellecken, -stegen und -wänden umschlossen und bildet dabei eine Zelle (Rohde, 02.2005; Ji, 2006). Schaumstoffe sind demzufolge ein Zweiphasengemisch, bei denen ein Gas in einer kontinuierlichen Matrix (Flüssigkeit oder Feststoff) dispergiert ist, wobei der Volumenanteil der Gasphase überwiegt. Die im Schaum vorhandenen Poren sind meist mit Luft gefüllt, wobei aber auch Gase wie Wasserstoff, die beispielsweise beim Schaumentstehungsprozess entweichen, in den Poren mit eingeschlossen sein können. Die Matrix des Schaummaterials kann aus den unterschiedlichsten Werkstoffen bestehen - angefangen von Fluiden bei Seifenschaum über natürliche Materialien wie Zellulose, aber auch Polymere bis hin zu Metallen wie Aluminium. Zu den natürlichen Schaumstoffen zählen beispielsweise Popcorn, Hölzer und Kork (Abbildung 2).

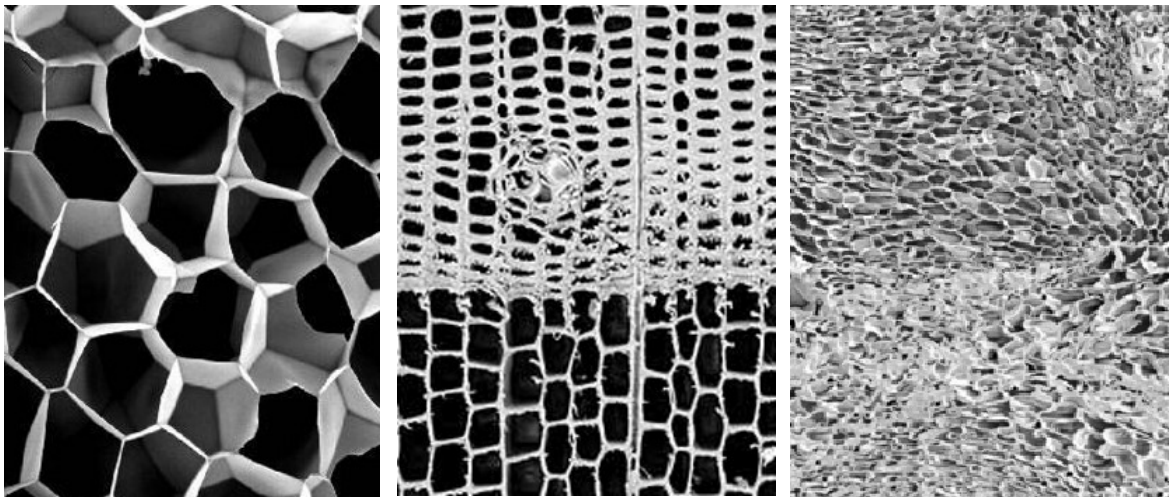


Abbildung 2: REM-Aufnahmen natürlicher Schäume links: Popcorn (Bützer, 2010); mittig: Fichte (proHolz Austria, 2010); rechts: Kork (MUCOS Korkproduktions GmbH, 2010)

Die in dieser Arbeit zu untersuchenden, zellulären Polymere zählen zu den weichelastischen Schaumstoffen, die wie folgt definiert sind. Ein weicher Schaumstoff weist laut DIN 7726 bei einer Druckbeanspruchung von 10 % Stauchung einen relativ geringen Verformungswiderstand ($< 15 \text{ kPa}$) auf. Elastische Schaumstoffe zeigen nach kurzzeitiger (15 s) Druckverformung um 50 % ihrer Dicke und anschließender Relaxationszeit von 10 min keine bleibende Verformung über 2 % der Ausgangsdicke. Weichelastische Schaumstoffe vereinen beide Eigenschaften.

2.2 Weichschäume als Dämpfungsmaterial in Sportanwendungen

Weichschaumstoffe werden im Sport in zahlreichen Anwendungen zur Dämpfung von Stößen und Schwingungen eingesetzt: Protektoren werden bevorzugt aus Polyurethan-Schaum gefertigt. Ethylen/Vinylacetat-Schaum wird in Gymnastik- und Yogamatten verwendet, wohingegen Bodenturn- und Weichbodenmatten aus Polyethylen-Schaum hergestellt werden. Vereinzelt werden Fitnessmatten auch aus Polyvinylchlorid-Weichschaum gefertigt. Als Material für Mundschützer hat sich massives Ethylen/Vinylacetat auf Grund seiner ausgezeichneten Eigenschaften wie minimale Feuchteaufnahme, Elastizität, einfache Verarbeitbarkeit und Biokompatibilität als Material für Mundschützer etabliert (Knapik et al., 2007). Als Werkstoffe für den Zwischensohlenbau haben sich im Laufe der Zeit weichelastische Schaumstoffe aus Ethylen/Vinylacetat und Polyurethan herauskristallisiert (Dubois et al., 2002). Die Verwendung dieser Kunststoffe begründet sich zum einen in den geringen Herstellungskosten und der einfachen Verarbeitbarkeit und zum anderen in den hervorragenden Materialeigenschaften, wie beispielsweise geringe Dichte bei gleichzeitig guter Haltbarkeit und Flexibilität (Krabbe 05.1994).

2.2.1 Ethylen/Vinylacetat (EVA)

EVA gehört zur Gruppe der Copolymere (Abbildung 3), dessen Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten je nach Anteil des radikalisch copolymerisierten Vinylacetates in einem weiten Bereich eingestellt werden können. Produkte mit 40 bis 80 % Vinylacetat-Anteil zeigen Kautschukeigenschaften (Schnetger, 2004). Das im EVA eingebaute Vinylacetat reduziert die

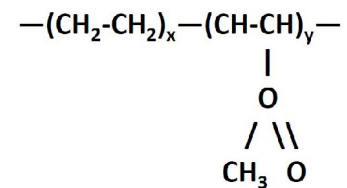


Abbildung 3: Strukturformel EVA

Kristallinität der Ethylensegmente, setzt damit den E-Modul herab und erhöht die Beweglichkeit der Kettensegmente derart, dass sich das Material wie ein Elastomer verhält bzw. zunehmend weicher, flexibler und zäher wird (Röthemeyer & Sommer, 2006; Knapik et al., 2007). Laut Knapik et al. (2007) erhöht sich dabei ebenso die Stoßabsorptionsfähigkeit.

Auf Grund ausgezeichneter Alterungsbeständigkeit, niedrigem Druckverformungsrest und hoher Elastizität wird vorwiegend EVA-Schaum als Grundmaterial für Zwischensohlen verwendet (ASTM D 3576-04; Schnetger, 2004). Dabei liegt der Vinylacetat-Anteil des Materials zwischen 18 bis 22 % (Verdejo & Mills, 2004a; McNair & Marshall, 1994). EVA-Schaum weist wie die meisten Polyolefin-Schäume eine

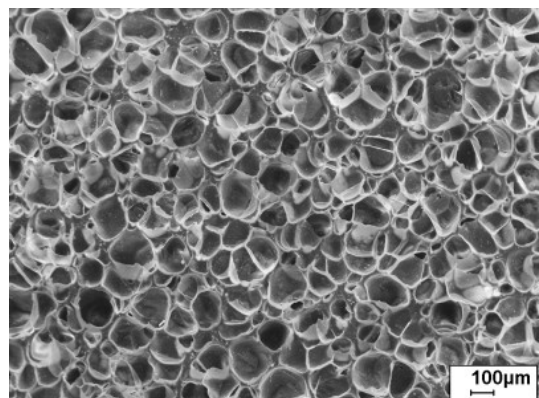


Abbildung 4: REM-Aufnahme eines EVA-Schaums

geschlossenzellige Struktur auf (Klempner & Aseeva, 2004), die durch vorwiegend sechseckige Poren gekennzeichnet ist (Abbildung 4). Des Weiteren bietet EVA auf Grund seiner Polarität eine gute adhäsive Bindungsfähigkeit mit anderen Materialien, was beispielsweise für das Verkleben mit weiteren Sohlenbauteilen günstig ist.

2.2.2 Polyurethan (PUR)

„Urethan“ bezeichnet eine chemische Verbindung eines Harnstoff- und eines Ethanolteiles, die durch die Atomverknüpfung ($-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$) gekennzeichnet ist. Beim chemischen Schäumen von Polyurethan reagieren energiereiche Polyisocyanate ($-\text{N}=\text{C}=\text{O}$) exotherm mit einer wasserstoffaktiven Verbindung, die mindestens zwei OH-Gruppen beinhaltet (Polyole), wobei gasförmiges Kohlendioxid CO_2 als Treibmittel und Harnstoff $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ entsteht (Leppkes,

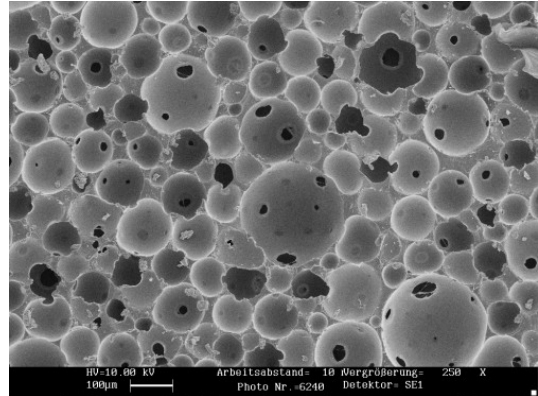


Abbildung 5: REM-Aufnahme eines PUR-Weichschaums (Bildnachweis: BASF Polyurethanes GmbH, Lemförde)

2003). Die Eigenschaften von PUR-Weichschaumstoffen sind in besonderem Maße von der Chemie (Wahl des Polyols bzw. Polyisocyanats) und der Verarbeitungstechnik (e.g. Heiß- oder Kaltschaum) des jeweiligen PUR-Systems beeinflussbar (Uhlig, 2006). PUR-Weichschaumstoffe sind in der Regel offenzellig (Abbildung 5), wobei sich Material auf Grund des elastischen Gerüsts bevorzugt als Dämpfungs- und Polstermaterial eignet (Leppkes, 2003). Die mikroskopische Struktur des PUR ist durch unterschiedlich große, kugelförmige Poren gekennzeichnet. Ein Nachteil des PUR gegenüber anderen Schaumstoffen liegt in dem Vergilben des Materials insbesondere durch UV-Strahlung. Die mechanischen Eigenschaften weisen einen geringeren Druckverformungsrest (Jenkins, 2003) und eine bessere Alterungsbeständigkeit und Haltbarkeit auf als EVA (Brückner et al., 2010). Zudem bietet das Material eine gute Adhäsion, sodass Zusatzbauteile bei der Herstellung ohne zusätzlichen Klebstoff verbunden werden können.

2.2.3 Weitere Schaummaterialien

Weniger verwendete Schaumstoffe in Sportanwendungen sind u.a. Polyolefin-Schäume (z.B. PE, PP), Polyvinylchlorid-Schäume (PVC) und expandiertes Polystyrol (EPS). Polyolefin-Schäume sind üblicherweise geschlossenzellig und resistent gegen Schimmel, Fäulnis und Bakterien. Sie weisen eine starke Rückstellfähigkeit auf und werden in Protektoren zur Stoßabsorption verwendet (American Foam Group, 2011). PVC-Weichschäume sind ebenfalls geschlossenzellig und zeichnen sich durch Rutschfestigkeit aus. EPS ist ein Partikel-

schaum, der aus etwa 2 bis 3 mm großen, zusammenhaftenden Schaumkugeln aufgebaut ist. Er zeichnet sich durch seine Feuchtebeständigkeit aus; ist allerdings wenig elastisch, nicht UV-beständig und sehr empfindlich gegen organische Lösungsmittel. In Sport und Freizeit wird EPS beispielsweise als stoßdämpfende Schaumstoffschale in Fahrradhelmen und sonstigen Schutzhelmen oder zur Verkleidung von Leitplankenpfosten eingesetzt.

2.3 Prüfung von Weichschaummaterialien in Sportanwendungen

Das in Sportanwendungen auftretende Lastkollektiv ist durch große Kräfte charakterisiert, die innerhalb sehr kurzer Zeit wirken. Zur Prüfung des Dämpfungsvermögens bzw. der Stoßabsorptionsfähigkeit von Weichschaumstoffen werden laut Durá et al. (2002) bei den meisten Materialtests in Sportanwendungen bestimmte maximale Parameter als Ergebnis eines Fall- oder Schlagpendeltests betrachtet wie beispielsweise maximale Kraft, maximale Beschleunigung und maximale Verformung, wodurch allerdings Informationen verloren gehen können, die für das Verständnis des Verformungsverhaltens wichtig sind.

Oben genannte Fall- bzw. Schlagpendeltests werden wie folgt eingesetzt: Nike verwendet einen Fallgewichtstest, um den Stoß des Fußes auf die Zwischensohle nachzustellen, wobei die Dämpfung anhand der maximalen Stoßbelastung beurteilt wird. Es wurde allerdings darauf hingewiesen, dass kein eindeutiger Zusammenhang von maximaler Stoßbelastung und der Empfindung der Dämpfung durch einen Athleten besteht (Alley & Nichols, 1999). Im Bereich von Sportmatten wird entsprechend DIN EN 12503-1 bis 7 je nach Sportart (Judo, Hochsprung, Stabhochsprung und Turnen) ein Fallgewicht aus einer festgelegten Höhe auf die Matte fallen gelassen, wobei Parameter wie die maximale Bremsbeschleunigung, maximale Eindringtiefe und der Rückstellkoeffizient untersucht werden. Ähnlich verhält es sich bei Stoßprüfungen von Motorradschutzbekleidung (EN 1621-2) und Protektoren zur Benutzung beim Eishockey (DIN 15256), bei denen ein Fallkörper mit einer bestimmten kinetischen Energie auf das Prüfmuster auftrifft und die Höchstkraftwerte die entsprechenden Grenzwerte nicht überschreiten dürfen. Bei Protektoren wie Ellbogen-, Knie- und Handgelenks-Schützern wirkt laut DIN EN 14120 und DIN EN 15613 eine bestimmte Kraft mittels eines Pendelprüfgerätes auf den Prüfkörper ein, woraufhin der Kraftverlauf über die Zeit oder die Spitzenkraft ausgewertet werden. Mundschützer in Körperkontakt-Sportarten wie Hockey, Football, Boxen und Kampfsport sind ebenfalls Sportgeräte, die auf hohe Stoßbelastungen ausgelegt werden. Diese werden mittels Schlagpendeltest geprüft, beim dem eine Stoßenergie, die beispielsweise der Energie eines auftreffenden Cricketballs entspricht, auf den Probekörper wirkt und die über das Mundschutzmaterial übertragene Kraft gemessen wird, um die Dämpfung des Materials zu bestimmen (Westermann et al., 2002a; Westermann et al., 2002b).

Die Stoßabsorptionsfähigkeit wird durch den Teil der einwirkenden Energie beschrieben, die vom Material absorbiert wird und als Wärme dissipiert. Diese wird - wie allgemein bekannt - über die Fläche innerhalb der Hysteresekurve im Kraft-Verformungs-Diagramm berechnet (Stefanyshyn & Nigg, 2003). Somit wird deutlich, dass das Dämpfungsvermögen nicht präzise über einen maximalen Wert bestimmt werden kann. Vielmehr muss die Kraft-Verformungs-Charakteristik betrachtet werden, um diese eindeutig bestimmen zu können. Laut Jenkins (2003) werden innerhalb der Sportgeräteentwicklung durchaus Tests zur Untersuchung der Kraft-Verformungs-Charakteristik angewendet, die allerdings in den meisten Fällen mit Belastungen durchgeführt werden, die niedriger sind als in der realen Situation (Determan et al., 2009).

Des Weiteren ist es auf Grund der Viskoelastizität der Materialien und der damit verbundenen Geschwindigkeitsabhängigkeit wichtig, eine die realen Belastungen nachbildende Testmethodik anzuwenden (Durá et al., 2002). Dies wird beispielsweise bei dem nach ASTM F1614-99 genormten Fallgewichtstest für die Prüfung von Sportschuhen deutlich. Denn trotz eines Energieeintrages, der im Bereich von biomechanisch ermittelten Werten liegt, zeigte dieser Test bei Schwanitz et al. (2010) keine hinsichtlich der Laufbewegung realistischen Kräfte und Belastungsgeschwindigkeiten auf. Auch Garcia et al. (1992) gingen auf diese Problematik ein und erklärten, dass die Einschätzung der Stoßabsorptionsfähigkeit von Laufschuhmaterialien üblicherweise auf der Ermittlung von Steifigkeit und Härte basiert. Dabei ist allerdings der Zusammenhang der beiden Parameter nicht klar, denn ein weiches Material muss nicht zwangsläufig stoßabsorbierend sein, und im Gegensatz dazu kann ein stoßabsorbierendes Material durchaus hart sein. Bei der Untersuchung von Steifigkeit und Stoßabsorptionsfähigkeit von Laufschuheinlegesohlen konnten Garcia et al. (1992) unterschiedliche Werte analysieren, die sie in der Viskoelastizität der Materialien begründet sahen. Damit bestätigten sich die oben genannte Aussagen, dass bei der Untersuchung von Laufschuhmaterialien die auftretenden Lasten während der Laufbewegung berücksichtigt werden müssen (García et al., 1992). In der Literatur fanden sich für die unterschiedlichen Sportarten folgende Prüfgeschwindigkeiten: Bei der genormten Prüfung von Laufschuhen ist eine Prüfgeschwindigkeit von 1,0 m/s vorgeschrieben (ASTM F1614-99). Kunstrasen wird mittels Fallkörpern geprüft, die mit Geschwindigkeiten von rund 1,0 m/s auftreffen (Fleming, 2011). Mills (2007) erklärt, dass die maximale Geschwindigkeit von außer Kontrolle geratenen Skiern, die auf geschäumte Matten treffen, bei rund 10 m/s liegt. Die Auftreffgeschwindigkeit eines fallenden Kletterers hängt von der Fallhöhe ab. Da Kletterwände selten über 5 m hoch sind, liegt die Spitzengeschwindigkeit nicht über 10 m/s. Die Prüfgeschwindigkeit des Schlagpendeltests bei Mundschützern ist der Bewegung des Cricketballs nachempfunden und beträgt

12 m/s.

Das außergewöhnliche Lastkollektiv in Sportanwendungen ist neben der Stoßgeschwindigkeit durch die auftretende, kinetische Energie gekennzeichnet. Abbildung 6 zeigt die im Sport auftretenden typischen Bereiche kinetischer Energien nach Carré (2004), die Werte von bis zu 100 J erreichen können.

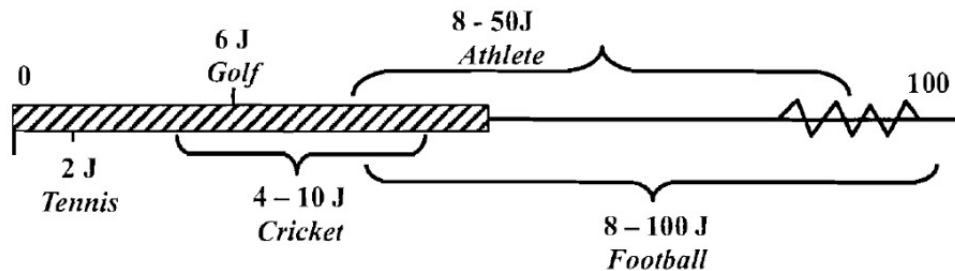


Abbildung 6: Sportanwendungstypische Bereiche der kinetischen Energie (Carré, 2004)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Kraft- bzw. Spannungs-Verformungs-Verhalten und nicht nur einzelne Maximalwerte zur Beschreibung des Stoßdämpfungsverhaltens in Sportanwendungen analysiert werden sollten, da sonst Informationen verloren gehen können. Zudem sollte auf Grund des außergewöhnlichen Lastkollektivs eine sportspezifischen Testcharakteristik angewendet werden, die die real auftretenden Belastungen wie die einwirkende Kraft, Energieeintrag, Verformungsgeschwindigkeit, Frequenz etc. nachbildet. Innerhalb der Literatur zeigte sich, dass die auftretenden Geschwindigkeiten im sportspezifischen Bereich von 1 bis 12 m/s und die einwirkenden, kinetischen Energien bei bis zu 100 J liegen. Ferner sollten auch Umgebungseinflüsse wie Temperatur, Feuchtigkeit etc. berücksichtigt werden (Verdejo, 2003).

2.4 Mechanisches Verformungsverhalten von Schäumen (σ - ϵ -Kurve)

Das mechanische Verformungsverhalten von Schäumen wird im Nachfolgenden durch die Kraft- oder Spannungs-Verformungs-Kurve beschrieben. Bei der Betrachtung der Spannungs-Verformungs-Kurve (σ - ϵ -Kurve) wird im Vergleich zur Kraft-Verformungs-Kurve (F - ϵ -Kurve) die komprimierte Fläche berücksichtigt, sodass das Verhalten von Probekörpern unterschiedlicher komprimierter Flächen miteinander verglichen werden kann. Die σ - ϵ -Kurve von Polymerschäumen wird im Allgemeinen in drei charakteristische Bereiche - wie in Abbildung 7 schematisch dargestellt - eingeteilt. Diese sind der linear-elastische Bereich, der darauf folgende Versagensbereich - auch als Versagensplateau bezeichnet - und der Verdichtungsbereich bei weiter ansteigender Verformung (Gibson & Ashby, 2001; Goods et al., 1998; Iannace et al., 2001; Verdejo, 2003).

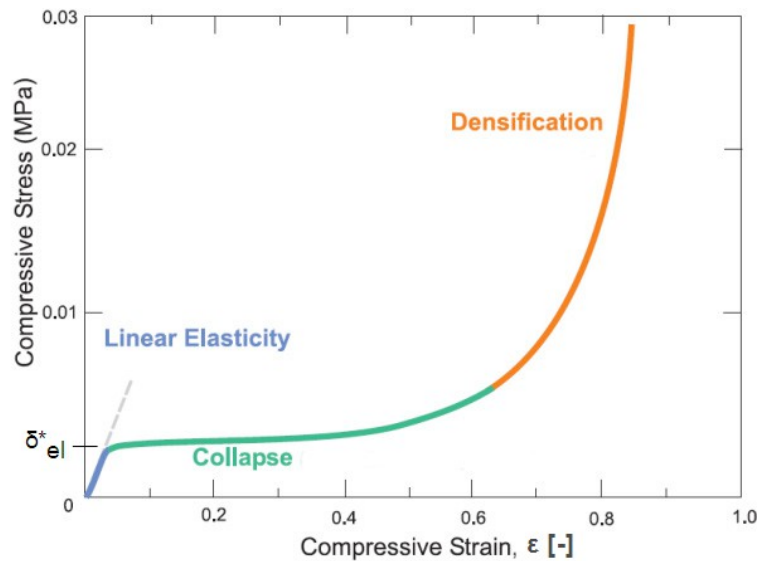


Abbildung 7: Schematische σ - ϵ -Verhalten eines Polymerschaums (Verdejo, 10.2003)

Zu Beginn der Belastung – im Bereich geringer Verformung (unter 5 %, Avalle et al., 2001) – verhält sich das Schaummaterial linear-elastisch (LEB: linear-elastischer Bereich), wobei über die Extrapolation der Anstiegskurve zwischen 0 und 5 % Verformung der E-Modul des Schaums E_s bestimmt wird. Dieser Anfangsbereich ist durch einen starken Anstieg an Spannung gekennzeichnet (Gibson & Ashby, 2001), wobei die in das Material eingebrachte Energie durch elastische Rückverformung wieder zurückgegeben werden kann (Fuss, 2009). Im darauf folgenden Bereich, dem so genannten Versagensbereich, steigt die Spannung nur leicht an (Gibson & Ashby, 2001), sodass auf Grund des relativ konstanten Spannungswertes dieser Bereich oft auch als Versagensplateau bezeichnet wird (Ouellet et al., 2006). Dieser Bereich wird bei Weichschäumen mit dem Ausknicken der Zellwände in Verbindung gebracht (Zhang et al., 1998). Der Beginn dieser mechanischen Instabilität der Schaumstruktur wird über die elastische Versagensspannung σ_{el}^* gekennzeichnet. Diese wird über den Schnittpunkt der Extrapolation der Anstiegskurve im linear-elastischen Bereich, dem E-Modul, und der Tangente des Versagensplateaus bestimmt (Gibson & Ashby, 1982). Im dritten Bereich, in dem der Modul erneut stark ansteigt, setzt die Verdichtung des Schaums ein (Avalle et al., 2007; Gibson & Ashby, 2001; Ouellet et al., 2006), wobei gegenüberliegende Zellen aufeinanderstoßen (Verdejo, 10.2003). Die Schaumdichte nähert sich der Dichte des Matrixmaterials an, sodass die Steigung der Spannungs-Verformungs-Kurve gegen den E-Modul des Matrixpolymers konvergiert (Weaire & Fortes, 1994). Der Beginn des Verdichtungsgebietes ϵ_D , kann laut Gibson und Ashby (2001) über Gleichung 1 berechnet werden.

$$\epsilon_D = 1 - 1,4 R \quad (1)$$

mit ϵ_D : Verformung [%], bei der der Verdichtungsbereich beginnt

R: relative Dichte [-]

2.5 Modelle zur Beschreibung der σ - ϵ -Kurve polymerer Schaumstoffe

2.5.1 Stochastisch-theoretische Modelle

2.5.1.1 Modelle von Rush

Zu den stochastisch-theoretischen Modellen zählen die Modelle von Rush (Rush, 1969; Rush, 1970a & Rush, 1970b). Diese verfolgen das Ziel, die beste Übereinstimmung mit dem mechanischen Verhalten zu erreichen – allerdings ohne direkten physikalischen Zusammenhang (Avalle et al., 2007). Das modifizierte Rush-Modell beispielsweise bestand aus zwei exponentiellen Gleichungen (Gleichung 2) (Avalle et al., 2007).

$$\sigma = A\epsilon^m + B\left(\frac{\epsilon}{1} - \epsilon\right)^n \quad (2)$$

mit ϵ : Verformung [%]

A, B, m, n: Variablen [-]

Der erste Term der Gleichung wurde zur Anpassung des Graphen an den Versagensbereich verwendet, wobei der zweite Term den Verdichtungsbereich modellierte. Die Parameter A und B berücksichtigten die entsprechende Dichte-Abhängigkeit des Materials. Abbildung 8 zeigt die sehr gute Übereinstimmung von experimentell ermittelter Spannungs-Verformungs-Kurve und der nach Rush modellierten Kurve für einen EPP-Schaum (Kompressionstest mit 60 mm/min Prüfgeschwindigkeit und 90 % maximale Verformung) (Avalle et al., 2007).

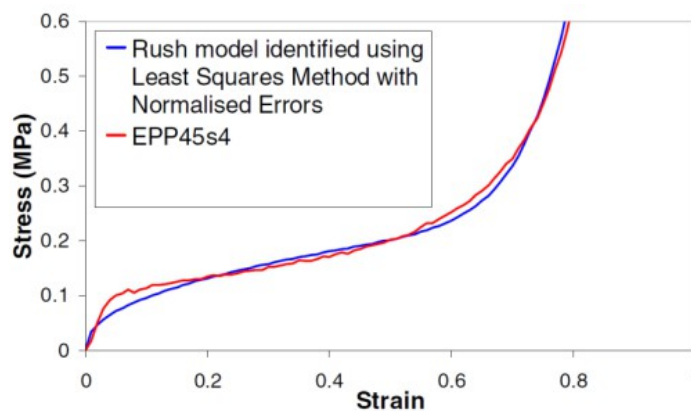


Abbildung 8: σ - ϵ -Kurve eines EPP-Schaums mit modellierter Kurve (Avalle et al., 2007)

2.5.1.2 Makroskopische Modelle

Eine weitere Möglichkeit das mechanische Verhalten eines viskoelastischen Materials, respektive eines Polymerschaums zu beschreiben, beruht auf makroskopischen Modellen, bei denen Hookesche Federn (elastischer Substituent) und Newtonsche Dämpfer (viskoser Substituent) in variabler Anzahl parallel und/oder in Reihe kombiniert werden.

Krabbe et al. (Krabbe, 1994; Krabbe, 05.1994) versuchten mittels eines solchen Modells das Kraft-Verformungs-Verhalten von Laufschuhen physikalisch sinnhaft zu erklären. Die Verwendung des Kelvin-Voigt-Modells, bei dem ein Dämpfer und eine Feder parallel

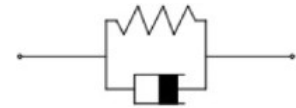


Abbildung 9: Kelvin-Voigt-Modell

geschaltet waren (Abbildung 9), ergab auch trotz eines Erweiterungsterms, der die zunehmende Verhärtung des Materials berücksichtigte, eine inakzeptable Übereinstimmung mit den gemessenen Ergebnissen. Erst ein Modell zur Beschreibung der nichtlinearen Viskoelastizität mit elf Unbekannten zeigte eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen Kraft-Verformungs-Kurve, wobei allerdings die Möglichkeit einer sinnvollen physikalischen Interpretation nicht mehr gegeben war. Auch Retting und Laun (1991) wiesen darauf hin, dass dieses Vorgehen die rechnerische Behandlung des vorliegenden Problems erleichterte und dieses unter Umständen durchaus qualitativ korrekt beschrieb, jedoch zum Verständnis der zugrunde liegenden molekularen und/oder mikroskopischen Vorgänge in keiner Weise beitrug.

2.5.2 Tetrakaidekaeder-Modelle (numerische Modelle)

In verschiedenen Literaturquellen wurden Tetrakaidekaeder (Abbildung 10) zur Modellierung von Schaummaterialien, so genannte Kelvin-Schäume, verwendet, um die mechanischen Schaumeigenschaften zu beschreiben (Almanza et al., 2004; Menges & Knipschild, 1975). Ein Tetrakaidekaeder besteht aus acht hexagonalen und sechs quadratischen Flächen. Tetrakaidekaeder-Schaummodelle sind sehr komplex, sodass für deren Berechnung – insbesondere für die Belastungsbereiche außerhalb der linear-elastischen Region – aufwändige, numerische Verfahren angewendet werden müssen (Mills & Zhu, 1999; Mills et al., 2003; Mills et al., 2009).

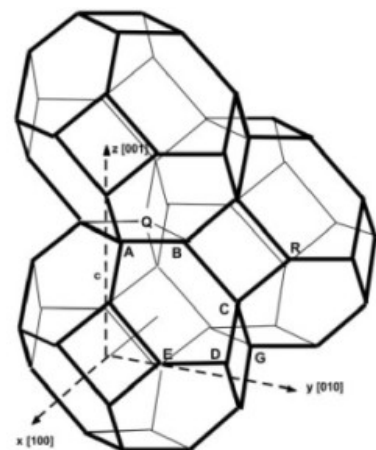


Abbildung 10: Tetrakaidekaeder (Almanza et al., 2004)

Mills und Zhu (1999) verwendeten das Kelvin-Schaummodell zur Beschreibung des σ - ϵ -Verlaufs eines geschlossenzelligen LDPE-Schaums ($R = 0,025$; $\rho = 0,024 \text{ g/cm}^3$). Die Übereinstimmung dieser mittels FEM modellierten Kurve mit der experimentellen Kurve war dabei sehr gut. Hierbei lieferte ab einer Verformung von rund 25 % die Zellgaskompression gegenüber dem Nachgeben der polymeren Zellwände den größten Anteil an der modellierten Spannung (Abbildung 11). Es wurde darauf hingewiesen, dass bei Schäumen mit einem hohen Zellwandanteil d.h. die Zellstege nur geringfügig dicker sind als die Wände, alternative Modelle verwendet werden müssen. Des Weiteren galt das verwendete Modell nur für Schäume mit relativen Dichten von $R < 0,1$.

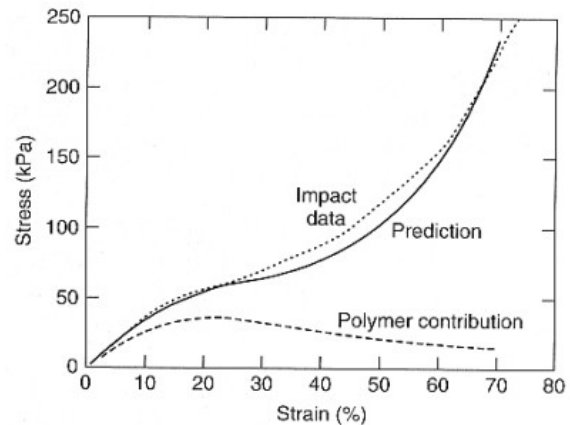


Abbildung 11: Experimenteller und modellierter σ - ϵ -Verlauf eines LDPE-Schaums (Mills & Zhu, 1999)

Fischer et al. (2009) verwendeten ebenfalls Tetraikaidekaeder-Schäume zur Modellierung von drei vernetzten, geschlossenzelligen PVC-Schäumen. Hierbei konnten sie eine gute Übereinstimmung von experimentellen zu modellierten Daten für den Kompressionsmodul unter quasi-statischer Belastung ermitteln.

2.5.3 Mikromechanische Modelle

2.5.3.1 Mikromechanisches Modell nach Gent und Thomas

Gent und Thomas (1959) verwendeten ein mikromechanisches Modell - bestehend aus einem Netzwerk dünner Fäden - um das Verhalten elastischer Schaumstoffe zu beschreiben (Abbildung 12). Das Verhalten wurde dabei in Abhängigkeit von E-Modul der Polymermatrix und Schaumdichte beschrieben. Es wurden nur befriedigende Übereinstimmungen von Versuchsergebnissen und Modell festgestellt.

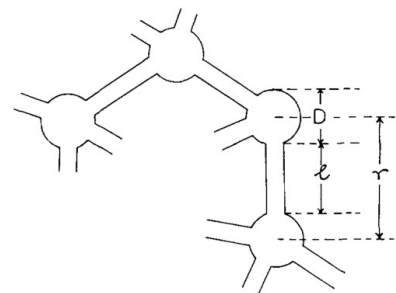


Abbildung 12: Modell nach Gent und Thomas (1959)

2.5.3.2 Einheitszellen-Modell nach Gibson und Ashby

Gibson und Ashby (2001) modellierten einen geschlossenzelligen Schaum aus aneinander gesetzten Einheitszellen, deren Knotenpunkte über Stege miteinander verbunden und von Zellwänden umgeben waren (Abbildung 13).

Der E-Modul im linear-elastischen Bereich setzte sich dabei aus drei Anteilen zusammen (Gleichung 3). Die erste Komponente berücksichtigte die elastische Durchbiegung der Zellstege, die zweite Komponente beinhaltete die Dehnung der Zellwände, die sich durch das Biegen der Stege ergab, und die letzte Komponente berechnete den Anteil des internen Gasdrucks in den geschlossenen Zellen. Die Verteilungskonstante Φ berücksichtigte den Anteil des Matrixmaterials in den Zellstegen in Relation zu den Zellwänden und ließ sich über fünf Geometrie-Variablen (u.a. Dicke der Zellwand etc.) ermitteln (Iannace et al., 2001).

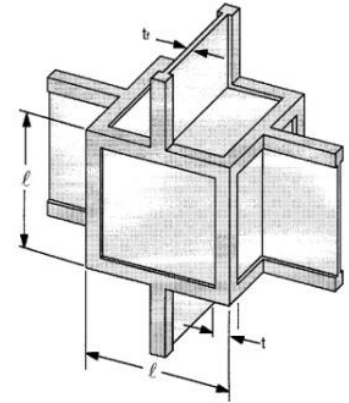


Abbildung 13: Einheitszelle eines geschlossenzelligen Schaums (Gibson & Ashby, 2001)

$$\frac{E_s}{E_p} \approx \underbrace{\phi^2 R^2}_{\text{Zellsteg}} + \underbrace{(1-\phi) \cdot R}_{\text{Zellwand}} + \underbrace{\frac{p_0(1-2\nu_s)}{E_p(1-R)}}_{\text{interner Gasdruck}} \quad (3)$$

Zellsteg Zellwand interner Gasdruck

mit E_s : E-Modul des Schaums [MPa]

E_p : E-Modul der Polymerphase [MPa]

Φ : Verteilungskonstante ($\Phi = 1$ für einen offenzelligen Schaum) [-]

p_0 : Initialer Gasdruck in den Schaumzellen [MPa]

ν_s : Poissonzahl des Schaums [-]

Die Autoren erläuterten, dass mit zunehmender Verformung die Spannung nur leicht anstieg, da die Zellstege begannen auszuknicken und zu versagen (Gibson & Ashby, 2001). Der Beginn dieses Versagensbereiches, der über den Parameter elastische Versagensspannung σ_{el}^* definiert wurde, ließ sich nach Gibson und Ashby (2001) näherungsweise durch die nachfolgende Formel berechnen (Gleichung 4). Der rechte Term der Formel bewirkte dabei ein Ansteigen der Versagensspannung mit zunehmender Verformung. Dieser Anstieg begründete sich darin, dass die Zellen ausknickten bzw. versagten und sich die Zellwände verbogen, sodass das in den Zellen komprimierte Gas eine Rückstellkraft gegen die Verformung ausübte (Iannace et al., 2001).

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_p} \approx 0,05 R^2 + \frac{p_0 \cdot \epsilon}{E_p(1-\epsilon-R)} \quad (4)$$

mit σ_{el}^* : Elastische Versagensspannung

Goods et al. (1998) nutzten das beschriebene Modell zur Untersuchung von E-Modul und elastischer Versagensspannung von geschlossenzelligen PUR-Hartschäumen bei quasi-

statischer Verformung. Dabei konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentell ermittelten Daten und den berechneten Werten festgestellt werden.

Im Gegensatz dazu stellten Fischer et al. (2009) bei quasi-statischer Untersuchung von vernetzten geschlossenzelligen PVC-Schäumen fest, dass die mechanischen Eigenschaften nicht durch das Modell von Gibson und Ashby (2001) berechnet werden konnte (Abbildung 14), da dieses Modell nur die relative Dichte und Steifigkeit der Polymerphase berücksichtigte. Um zuverlässigere Daten der mechanischen Eigenschaften zu erhalten, sollte ihrer Meinung nach die Struktur des Schaumes in der Modellvorstellung berücksichtigt werden. Dieses Defizit konnte

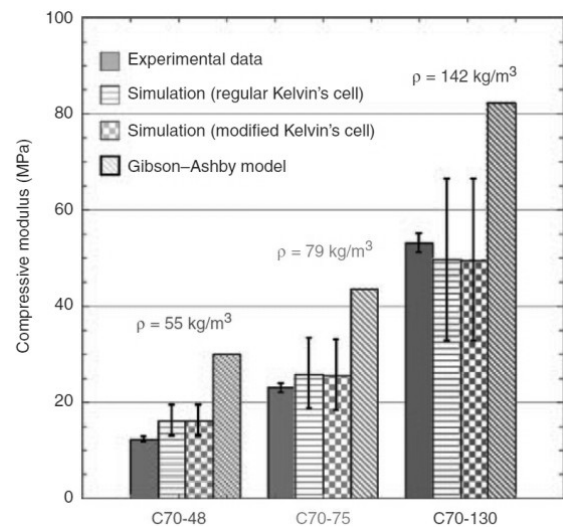


Abbildung 14: Vergleich der experimentellen und simulierten Ergebnisse des Kompressionsmoduls (Fischer et al., 2009)

von Bureau und Gendron (2003) ebenfalls festgestellt werden. In ihren Untersuchungen zeigten Schäume gleicher Dichte, aber unterschiedlicher Zellgrößenverteilung ebenso unterschiedliche mechanische Eigenschaften, was bei Gibson und Ashby (2001) keine Berücksichtigung gefunden hatte.

Auch Kenesei et al. (2004) kritisierten das Modell von Gibson und Ashby (2001), das für offenzellige Schäume mit Wabenstruktur bzw. für einen idealen Schaum - bestehend aus Zellen einheitlicher Form und Größe - eine gute Beschreibung darstellte, aber bei geschlossenzelligen Schäumen insbesondere mit unterschiedlichen Zellgrößen (Zellgrößenverteilung) an seine Grenzen gelangte.

2.5.4 Physikalische Modelle

2.5.4.1 Luftfeder-Modell

Verschiedene physikalische Modelle berücksichtigen das in den Zellen eingeschlossene Gas (Luft) als ein federndes Medium, das in einem festen Zylinder über einen Kolben zusammengedrückt wird (Abbildung 15 links). Die Federkennlinie einer solchen Luftfeder verläuft progressiv (Abbildung 15 rechts).

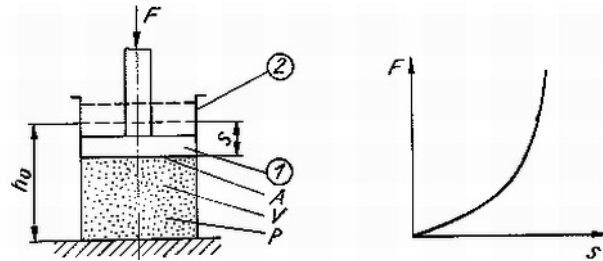


Abbildung 15: Prinzip einer Luftfeder und deren Federkennlinie (Wanke, 1993)

Für den Druck p und das Volumen V eines realen Gases gilt folgender Zusammenhang (Gleichung 5) (Wanke, 1993):

$$pV^n = \text{konstant} \quad (5)$$

mit n : Polytropenexponent [-] mit $1 < n < \kappa$

Im realistischen Fall liegt eine polytrope Zustandsänderung vor, bei der ein Teil der Wärme mit der Umgebung ausgetauscht wird, sodass die Kurve dieser Zustandsänderung im p,V -Diagramm zwischen Isotherme ($n = 1,0$) und Isentrope ($n = \kappa = 1,4$) verläuft. Eine isotherme Zustandsänderung (ungehinderter Wärmeaustausch mit der Umgebung) kann als Sonderfall angesehen werden. Ebenfalls lässt sich die Bedingung völliger Wärmeisolierung kaum realisieren. Allerdings kann man laut Kuchling (1999) bei sehr schnell ablaufenden Zustandsänderungen dieser Bedingung sehr nahe kommen.

Hilyard und Cunningham (1994) erklärten, dass bei der Druckverformung eines geschlossenzelligen Schaums eine Gaskomprimierung und damit eine pneumatische Dämpfung in Form einer Luftfeder stattfindet. Mills et al. (2003) untersuchten das Prinzip der Luftfeder anhand des konkreten Anwendungsfalles und betrachteten die Gaskompression anhand einer einzelnen Makro-Gaszelle im Schaum (Abbildung 16). Dabei sollte der gleiche Gasdruck in den benachbarten Zellen vorherrschen, sodass sich die Zellen nicht ausbeulten (Poissonzahl = 0), sondern das darin eingeschlossene Gas komprimiert wurde. Das Volumen des komprimierten Gases wurde über den Term $1 - \varepsilon - R$ berechnet, wobei das Polymer bzw. Elastomer inkompressibel war (Röthemeyer & Sommer, 2006).

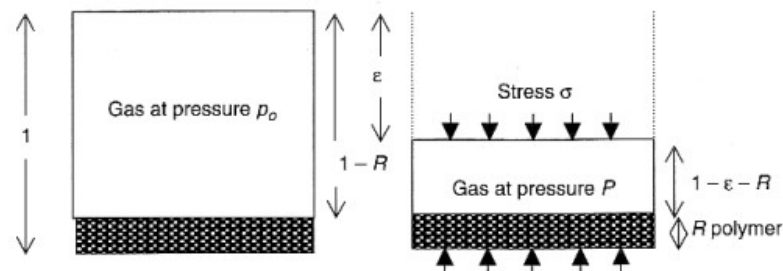


Abbildung 16: Gasvolumen in einem Schaum vor und nach uniaxialer Druckbelastung (Mills et al., 2003)

Mit Hilfe eines Computer-Modells wurde der Wärmetransport innerhalb eines Schaums untersucht (Mills & Gilchrist, 1997a). Beim Vergleich der Erkenntnisse mit experimentellen σ - ϵ -Kurven von PE-Schäumen zeigte sich, dass die Bedingungen auch unter dynamischer Belastung nahezu isotherm waren. Somit ergab sich (Gleichung 6):

$$p_0(1-R) = p(1-\epsilon-R) \quad (6)$$

mit p_0 : Anfangsdruck in den Schaumzellen [MPa], i.d.R. Atmosphärendruck (0,1 MPa)

p : Absolutdruck des komprimierten Gases [MPa]

ϵ : Verformung [%]

R : relative Dichte [-]

Die Spannung des komprimierten Gases ließ sich nach Gleichung 7 berechnen (Rush, 1970b). Dieser Term fand auch in der Berechnung von Gibson und Ashby (2001) (Gleichung 4) Berücksichtigung.

$$\sigma_G = \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - R} \quad (7)$$

mit σ_G : Spannung des komprimierten Gases [MPa]

Die Spannung im Versagensbereich wurde demzufolge zwischen der Polymerstruktur (Gerüst) und dem komprimierten Gas aufgeteilt, sodass sich für die Gesamtspannung σ_s (Gleichung 8) ergab (Gibson & Ashby, 2001).

$$\sigma_s = \sigma_P + \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - R} \quad (8)$$

mit σ_s : Gesamtspannung [MPa]

Tordon und Randall (1993) untersuchten das Druckverhalten eines geschlossenzelligen EVA-Schaums ($\rho = 0,035 \text{ g/cm}^3$) mittels oben genannter Formel (8). Das isotherme Verhalten der komprimierten Luft in den Zellen wurde nach Rush (1970b) berechnet und vom Schaum-Antwortverhalten subtrahiert, sodass sich für das vorliegende Material ein konstanter Polymer-Anteil von 140 MPa ab dem linear-elastischen Bereich (rund 0,6 % Verformung) ergab (Abbildung 17). Dieser dominierte gegenüber dem Anteil der komprimierten Luft das Verhalten im Schaum.

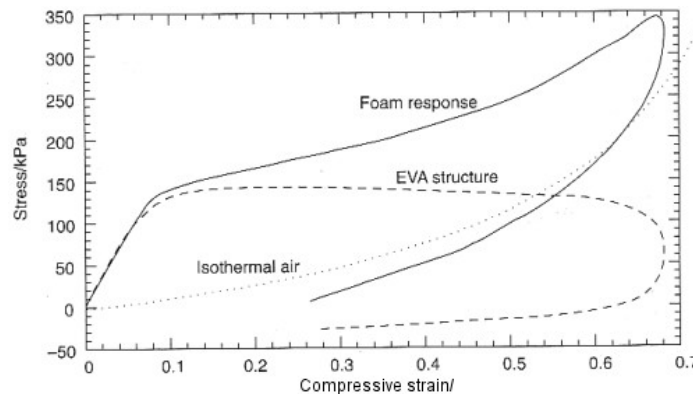


Abbildung 17: Verformungsverhalten eines EVA-Schaums mit Anteilen von isotherm komprimierter Luft und EVA (Tordon & Randall, 1993)

Auch Mills et al. (2009) stellten bei der Analyse von LDPE-Schäumen (ρ : 22 bis 68 g/cm³, R : 0,02 bis 0,07), die bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 5 m/s geprüft wurden, fest, dass der Anteil der Polymerphase zwischen 10 bis 60 % Verformung nahezu konstant war, und der Anstieg der Druckspannung des Schaums in diesem Bereich von dem in den Zellen komprimierten Gas verursacht wurde. In einer weiteren Veröffentlichung erklärte Mills (2007), dass der Anteil des in den Zellen komprimierten Gases den Versagensmodul für geschlossenzellige flexible Schäume mit relativen Dichten von $R < 0,1$ dominierte, wohingegen dieser Anteil für Schäume höherer Dichten unwesentlich war.

Gibson und Ashby (2001) verwendeten oben genannte Berechnungsformel (8) zur Untersuchung eines geschlossenzelligen LDPE-Schaums ($\rho_s = 0,043$ g/cm³) bei unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten. Abbildung 18 zeigt die σ - ϵ -Verläufe des LDPE-Schaums und den darin enthaltenen Anteil des Gasdrucks (p_0 = Atmosphärendruck). Durch Subtraktion dieses Gasanteils ergaben sich entsprechende σ - ϵ -Kurven, die die typische Form von offenzelligen Materialien aufzeigen (Abbildung 19). Wie auch in voran gegangener Literaturstelle (Tordon & Randall, 1993) zeigte die Spannungs-Verformungs-Kurve nach Überschreiten des linear-elastischen Bereiches zunächst einen konstanten (horizontalen) Verlauf. Beim Vergleich der Versagensspannungen von Schaum und massivem Material in Abhängigkeit von der Verformungsrate wurde deutlich, dass die Verformungsraten-Abhängigkeit des Schaums mit der des Zellwandmaterials übereinstimmte, sodass eine Verformungsraten-Abhängigkeit nicht in einem Übergang von isothermer zu adiabatischer Kompression des Gases begründet war. Es wurde betont, dass das Gas auf Grund seines engen Kontakts mit dem Zellwandmaterial immer isotherm war, da es eine thermische Kapazität aufwies, die deutlich größer war als die des Gases. Daher war der Anteil des in den Zellen eingeschlossenen Gases verformungsraten-unabhängig (Gibson & Ashby, 2001). Auch Mills und Gilchrist (1997b) bestätigten, dass bei kurzzeitigen Drucktests (< 1 min) isotherme Bedingungen vorherrschten.

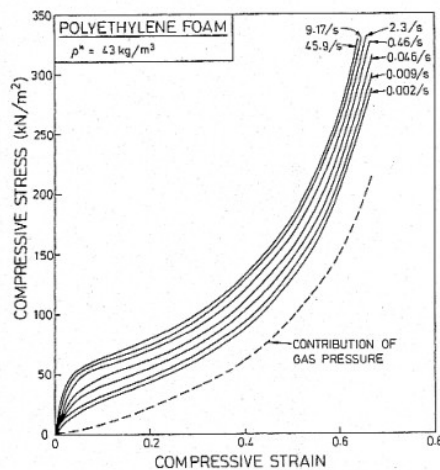


Abbildung 18: σ - ϵ -Kurven von geschlossenzelligen LDPE-Schäumen (Gibson & Ashby, 2001)

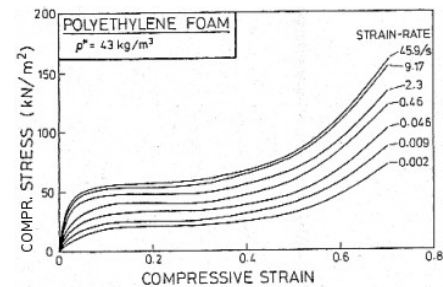


Abbildung 19: σ - ϵ -Kurven nach Subtraktion des Gasanteils (Gibson & Ashby, 2001)

2.5.4.2 Element-Modell nach Fuss

Fuss (2009) modellierte einen geschlossenzelligen Schaum durch die Kombination von sowohl parallel als auch in Serie geschalteten gasgefüllten Zellen und Polymermatrix-Elementen:

- Horizontales Element (Zellstege und -wände)
- Zellgas, in Serie geschaltet mit horizontalen Elementen
- Vertikales Element (Zellstege und -wände), das parallel mit den beiden oberen Anteilen geschaltet war.

Das Modell basierte sowohl auf einem physikalischen als auch auf einem mikromechanischen Ansatz. Abbildung 20 zeigt links das Modell der drei kombinierten Elemente vor und nach dem Knicken und rechts die 2-D-Schaumstruktur bestehend aus vier Reihen und Spalten mit zwei geknickten Elementen (rot gefärbt) unter vertikaler Druckbelastung. Jedes Element stellte einen Anteil am Schaum dar, der von der relativen Dichte abhängig war. Der E-Modul des in den Zellen eingeschlossenen Gases wurde basierend auf dem Luftfeder-Modell wie folgt berechnet (Gleichung 9):

$$E_G = p_0 \frac{(1-R)}{(1-\epsilon-R)^2} \quad (9)$$

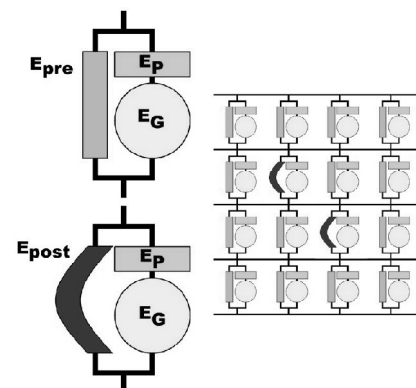


Abbildung 20: links: Modell der drei kombinierten Elemente vor und nach Knicken; rechts: 2-D-Schaumstruktur (Fuss, 2009)

Laut Goods et al. (1998) stellte die Versagensspannung den Beginn des Ausknickens der Zellstege dar, wohingegen der Versagensbereich laut Gibson und Ashby (2001) den Bereich nachträglichen Ausknickens beschrieb. Zur Analyse dieses Übergangsbereiches führte Fuss (2009) quasi-statische Druckverformungstests an einem geschlossenzelligem HD-PE-Schaum ($R = 0,0384$) durch und stellte mit Hilfe des oben definierten Modells fest, dass die ersten vertikalen Elemente weit unterhalb der elastischen Versagensspannung σ_{el}^* , im Bereich von rund einem Drittel σ_{el}^* versagten und durchschnittlich 93 % der vertikalen Anteile im Bereich der σ_{el}^* ausknickten. Diese Aussage konnten Fuss und Allgeuer (2009) an drei geschlossenzellige LDPE-Schäumen ($0,144 \text{ g/cm}^3$; $0,064 \text{ g/cm}^3$ und $0,045 \text{ g/cm}^3$) bestätigen, sodass die Versagensspannung vielmehr den Endpunkt des Versagens der Zellstege darstellte. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass Schäume mit höheren Dichten bei höheren Spannungen ausknickten.

2.5.5 Zusammenfassung und Bewertung der Modellvorstellungen

2.5.5.1 Stochastisch-theoretische Modelle

Stochastisch-theoretische Modelle wie von Rush oder Feder-Dämpfer-Modelle verfolgen das Ziel, die beste Übereinstimmung mit den experimentellen Daten zu erreichen. Allerdings sind diese Modelle nicht in der Lage, Aussagen über die physikalischen Ursachen der beobachteten Abhängigkeiten zu treffen (Avalle et al., 2007), sodass diese Modelle in der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt werden.

2.5.5.2 Tetrakaidekaeder-Modelle (Numerische Modelle)

Schaum-Modelle, die aus Tetrakaedern aufgebaut sind (so genannte Kelvin-Schäume), können eine durchaus gute Qualität hinsichtlich der Übereinstimmung mit den experimentellen Werten aufzeigen, wie beispielsweise bei Mills und Zhu (1999). Hier konnte eine gute Übereinstimmung von experimentellem und modelliertem σ - ε -Verlauf eines LDPE-Schaums ermittelt werden.

Auf Grund der Komplexität sind Tetrakaidekaeder-Modelle grundsätzlich mit einem hohen Aufwand verbunden. Brydon et al. (2005) erklärten dies wie folgt: „Für die Verwendung der Finiten Elemente Methode (FEM) ist es erforderlich, die idealisierte Schaumstruktur mittels geeigneter Netzstruktur zu diskretisieren, was sich für Tetrakaidekaeder schwierig gestaltet. Die Diskretisierung realer Schaumstrukturen ohne einheitliche Zellgröße gestaltet sich demnach noch schwieriger“, sodass diese Modelle für die vorliegende Arbeit nicht in Betracht gezogen werden.

2.5.5.3 Mikromechanische Modelle

Das nach Gibson und Ashby (2001) gewählte Materialmodell, besteht aus einer stark vereinfachten Zellgeometrie. Dennoch müssen für die Bestimmung des Schaum E-Moduls neben der relative Dichte und Steifigkeit der Polymerphase fünf Geometrieparameter für einen geschlossenzelligen Schaum ermittelt werden, um den Anteil des Matrixmaterials in den Zellstegen der Einheitszellen genau beschreiben zu können. Die Schwierigkeit liegt dabei in der genauen Differenzierung von Zellsteg und Zellwand. Für Hartschäume konnte eine durchaus gute Übereinstimmung festgestellt werden, wohingegen dieses Modell bei Weichschäumen – insbesondere bei anisotropen Weichschäumen und breiten Zellgrößenverteilungen – seine Grenzen erreichte. Deutlich wurde dies in verschiedene Literaturquellen (Bureau & Gendron, 2003; Fischer et al., 2009; Kenesei et al., 2004), die die fehlende Berücksichtigung von Zellgröße bzw. deren Verteilung bemängelten. Aus diesem Grund werden diese Modelle als „weniger geeignet“ für die vorliegende Problematik beurteilt. Allerdings wird aus den dargestellten Untersuchungen deutlich, dass es für ein Modell zur Beschreibung eines realen Weichschaums wichtig ist, die zelluläre Struktur zu berücksichtigen. Dies wird in Kapitel 2.6.1.3 umfassend erläutert werden.

2.5.5.4 Physikalische Modelle

Das Element-Modell nach Fuss (2009) ist lediglich von der relativen Dichte eines Schaums abhängig. Es eignete sich gut, um die Anzahl der ausgeknickten Zellen im Bereich der elastischen Versagensspannung zu ermitteln. Eine Beschreibung des Spannungs-Verformungsverlaufes wurde mit diesem Modell allerdings nicht beabsichtigt bzw. erreicht. Der E-Modul der mit Luft gefüllten Zellen wurde dabei anhand einer Luftfeder berechnet.

Bei dem Modell nach Gibson und Ashby (2001) setzte sich der Spannungsverlauf des Weichschaums über den Anteil der Spannung des offenzelligen Schaummaterials (Gerüst) und den Anteil des in den Zellen eingeschlossenen Gases zusammen. Letzter wurde wie in vorangegangenen Modell mittels Luftfeder berechnet. Für das Modell galten bestimmte Voraussetzungen wie inkompressible Polymerphase, Geschlossenzelligkeit und keine Querausdehnung (Poissonzahl = 0). Eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten konnte für einen EVA-Weichschaum ($\rho = 0,035 \text{ g/cm}^3$) bei quasi-statischer Verformung ermittelt werden. Aus diesem Grund wird das letzte Modell für die vorliegende Problematik am geeignetsten beurteilt und zunächst als Ansatz zur Modellerstellung gewählt.

2.5.5.5 Modellansatz

Das letzte Modell nach Gibson und Ashby (2001) als Funktion der beiden Phasen - Matrix und gasgefüllte Zellen - in Abhängigkeit von der Verformung bildet die Basis für das zu generierende Modell (Gleichung 10).

$$\sigma_s(\epsilon) = \sigma_g(\epsilon) + \sigma_p(\epsilon) \quad (10)$$

mit $\sigma_s(\epsilon)$: Spannung des Schaums [MPa]
 $\sigma_g(\epsilon)$: Spannung der gasgefüllten Zellen [MPa]
 $\sigma_p(\epsilon)$: Spannung der Matrixphase (Polymer) [MPa]
 ϵ : Verformung [%]

Die Spannung der unter Druck komprimierten Zellen σ_g wird entsprechend verschiedener Autoren (Fuss, 2009, Gibson & Ashby, 2001; Mills et al., 2003) mittels Luftfeder-Modell berechnet. Da der Atmosphärendruck als konstant angesehen wird, ergibt sich für die Spannung des Schaums eine Funktion von Polymerphasen-Spannung und relativer Dichte (Gleichung 8). Dies wurde bereits in Kapitel 2.5.4.1 erläutert.

$$\sigma_s(\epsilon) = f(\sigma_p(\epsilon), R)$$

$$\sigma_s(\epsilon) = \sigma_p(\epsilon) + \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - R} \quad (8)$$

mit p_0 : Atmosphärendruck [MPa]
 R : relative Dichte des Schaums [-]

Als Voraussetzungen für das Modell gelten bestimmte Voraussetzungen wie inkompressible Polymerphase, Geschlossenzelligkeit und keine Querausdehnung (Poissonzahl = 0).

Das Phasengemisch Schaum setzt sich aus Gas- und Matrixphase zusammen. Einflüsse, die aus diesen beiden Phasen auf das mechanische Verformungsverhalten des Schaums resultieren, werden im Nachfolgenden erläutert und im Modell Berücksichtigung finden.

2.6 Einflüsse auf die σ - ϵ -Kurve des Schaums

2.6.1 Einflüsse der Gasphase

2.6.1.1 Einfluss der Dichte

Die Dichte von polymeren Schäumen, Schaumdichte ρ_s [g/cm³], wird über das Verhältnis von Masse zu Volumen des Probekörpers bestimmt (Gleichung 11) (DIN EN ISO 845).

$$\rho_s = \frac{m}{V} \quad (11)$$

mit ρ_s : Schaumdichte [g/cm³]
 m : Masse des Probekörpers [g]
 V : Volumen des Probekörpers [cm³]

Moderne Schäum-Technologien ermöglichen die Produktion von geschäumten Polymeren in einem weiten Dichtebereich bei einem Gasgehalt von 10 bis 99,5 %. Grundsätzlich können zelluläre Polymere entsprechend ihres Dichtewertes in fünf Gruppen eingeteilt werden:

- sehr leicht (ρ : 0,003 bis 0,05 g/cm³)
- leicht (ρ : 0,05 bis 0,2 g/cm³)
- mittel (ρ : 0,2 bis 0,5 g/cm³)
- schwer (ρ : 0,5 bis 0,7 g/cm³)
- superschwer ($\rho > 0,7$ g/cm³)

Die relative Dichte R [-] (Gleichung 12) berechnet sich aus dem Verhältnis von Schaumdichte ρ_s zu Dichte der Polymerphase ρ_p , aus der die Zellwände aufgebaut sind. Die relative Dichte von Schaumstoffen liegt üblicherweise bei 0,05 bis 0,2. Mit zunehmender relativer Dichte nehmen die Zellwanddicke zu und der Porenraum ab, so dass bei einem Wert von rund 0,3 der Übergang von einer zellulären Struktur zu einem Festkörper mit isolierten Poren liegt (Gibson & Ashby, 2001).

$$R = \frac{\rho_s}{\rho_p} \quad (12)$$

mit R : relative Dichte [-]

ρ_s : Dichte des Schaummaterials [g/cm³]

ρ_p : Dichte der Polymerphase [g/cm³]

Die Porosität Φ [-] beschreibt die Anzahl der tatsächlich vorliegenden Hohlräume und stellt das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen eines Schaums dar (Gleichung 13).

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \quad (13)$$

mit Φ : Porosität [-]

Laut verschiedener Autoren stellt die Schaumdichte einen wichtigen Einflussfaktor auf das mechanische Verformungsverhalten von Schäumen dar, was wie folgt erläutert wird:

Lin (1997) untersuchte den Druckspannungs-Verformungs-Verlauf von geschlossenzelligen PVC-Schäumen unterschiedlicher Dichte (ρ : 0,03 bis 0,08 g/cm³) unter quasi-statischer Belastung. Dabei stellte er fest, dass mit zunehmender Schaumdichte der E-Modul und die Versagensspannung anstiegen und die Verformung, bei der die Verdichtung des Materials einsetzte, abnahm. Lin (1997) begründete Letzteres darin, dass durch die Zunahme des Volumenanteils des Matrixmaterials, die Zellwände unter Druckverformung früher aufeinander stießen, sodass der Verdichtungsprozess bei geringerer Verformung einsetzte. Der An-

stieg des E-Moduls mit steigender Dichte beruhte auf der Zunahme der Zellwanddicke und der damit verbundenen Widerstandsfähigkeit gegen Biegung. Vergleichbare Feststellungen wurden von Avalle et al. (2001) ermittelt. Grafisch verdeutlicht wird dies in Abbildung 21.

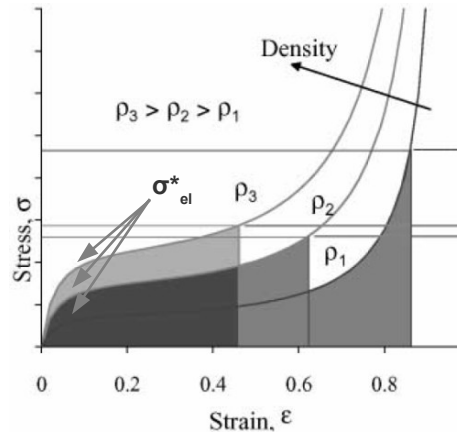


Abbildung 21: σ - ϵ -Kurven eines Schaums unterschiedlicher Dichte (Avalle et al., 2001)

Bouix et al. (2009) stellten neben des Anstiegs von E-Modul und Versagensspannung mit steigender Dichte ein charakteristisches Materialverhalten von PP-Schaumstoffen fest (Abbildung 22): Die σ - ϵ -Kurven verliefen im Versagensbereich für Schäume niedriger Dichten (bis 0,088 g/cm³) nahezu horizontal und zeigten bei höheren Schaumdichten einen zunehmenden Anstieg.

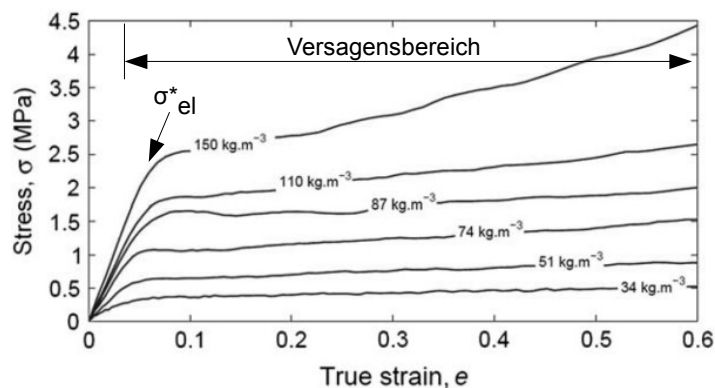


Abbildung 22: σ - ϵ -Kurven für geschäumtes PP unterschiedlicher Schaumdichte (Bouix et al., 2009)

2.6.1.2 Einfluss der Schaumhärte

Unter der Härte eines Werkstoffes versteht man den Widerstand, den der Werkstoff dem Eindringen eines Eindringkörpers bestimmter Form unter einer definierten Federkraft und unter vorgegebenen Bedingungen entgegensetzt. Dieser verhält sich indirekt proportional zur Eindringtiefe (Röthemeyer & Sommer, 2006). Die Bestimmung der Härte ist eine zerstörungsfreie, quasi-statische Standardprüfung für Weichschäume, deren Wert ganzzahlig angege-

ben wird.

Das Durometer, das planparallel auf dem Probekörper aufliegt, besteht aus einem kugelförmigen Eindringkörper (Indentor), der mit einer Anpresskraft von 12,5 N in das Prüfmaterial eingedrückt wird (Heinrich Bareiss Prüfgerätebau GmbH) (Vergleichbares Härtemessgerät in Abbildung 23). Der Messwert in der Einheit Asker C wird nach drei Sekunden von der Skala auf dem Gerät abgelesen. Dabei sollte die Ablesezeit genau eingehalten werden, um die Messwerte trotz der viskoelastischen Eigenschaften der Elastomere vergleichen zu können (Röthemeyer & Sommer, 2006). Je geringer der

Asker C-Wert, desto weicher ist demnach das Material und umgekehrt (Dubois et al., 2002).

Auf Grund der geringen Eindringtiefe des Eindringkörpers von maximal 2,5 mm wird die Materialeigenschaft lediglich an der Oberfläche des Schaums gemessen. Dementsprechend wird eine Probekörperdicke ≥ 4 mm empfohlen (DIN EN ISO 2039-1). Hinsichtlich einer maximal zulässigen Zellgröße gibt es keine Vorschrift, die bei diesem Prüfverfahren berücksichtigt

werden muss. So ist es unter Umständen nicht auszuschließen, dass der Indentor bei entsprechender Zellgröße in eine offene Zelle an der Oberfläche eindringt, was die Härte-Ergebnisse beeinflussen könnte (Abbildung 24).

Die Messung der Härte nach Asker C findet seine allgemeine Anwendung in der Sportschuh-industrie zur Überprüfung der Härte von Zwischensohlenmaterialien (Elmoutaouakkil et al., 2003) und zur Qualitätskontrolle (Mills, 2007). Alley und Nichols (1999) und Garcia et al. (1992) erklärten, dass die Härte weithin als Beurteilungsmethode von Weichschäumen bzw. deren Stoßdämpfungsfähigkeit eingesetzt wird, obwohl sie diese für ein ungenaues und grobes Maß halten. Verschiedene Autoren ermittelten einen direkt proportionalen Zusammenhang von Härte und Schaumdichte (Brückner, 01.2009; Shih et al., 2011; Yick et al., 2010), sodass von einer Abhängigkeit des σ - ε -Verhaltens von der Härte auszugehen ist, obwohl kein Aussage zu diesem Zusammenhang in der Literatur gefunden wurde. Voraussetzung hierfür ist ein identisches Matrixmaterial der Schäume.

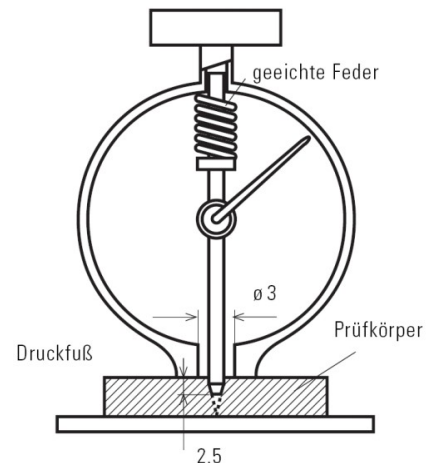


Abbildung 23: Härtemessgerät (Röthemeyer & Sommer, 2006)

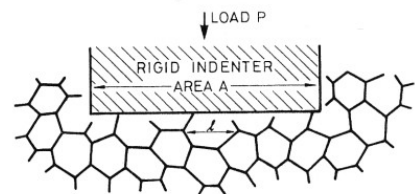


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Härtemessung (Gibson & Ashby, 2001)

2.6.1.3 Einflüsse der zellulären Struktur

Schaumstoffe besitzen eine mikroskopische Zellstruktur, die sich aus Zellen unterschiedlicher Formen, Größen und Volumina zusammensetzt und sich über Parameter wie Zellgröße, Zelldurchmesser bzw. Zellvolumen, Zellwanddicke, Zelligkeit und Anisotropie beschreiben lässt (Klempner & Aseeva, 2004; Gibson & Ashby, 2001; Skochdopole & Rubens, 1965).

Zellgröße bzw. Zelldurchmesser (Zellwanddicke, Zellanzahl)

Zur Beschreibung der Zellstruktur ist die Zellgröße bzw. der Zelldurchmesser und deren Verteilung das am meisten verwendete Beurteilungsmerkmal von polymeren Schaumstrukturen (Klempner & Aseeva, 2004). Um diese Parameter zu ermitteln, sind verschiedene qualitative Analysemethoden möglich: Die einfachste Methode zur Bestimmung der Zellgröße bzw. des Zelldurchmessers beruht darauf, die Zelle als eine Kugel anzusehen. Entsprechend ASTM D 3576-04 wird bei Hartschaummaterialien ein Dünnschnitt erstellt und mittels Diaprojektor ein Schattenabbild generiert. Durch das Bild wird eine gerade Referenzlinie gezogen, die mindestens 20 Zellen schneidet. Es wird die mittlere Sehnenlänge durch das Verhältnis von Länge der Referenzlinie zu Anzahl der gezählten Zellen berechnet. Diese Sehnenlänge entspricht dabei rund 62 % des wahren Zelldurchmessers. Eine ähnliche Messmethode verwendeten Lewis et al. (1996), wobei eine Zelle als Pentagondodekaeder modelliert wurde. Da bei diesen Methoden nur eine mittlere Zellgröße und keine Verteilung bestimmt wurde, sind diese Methoden allerdings auf Schäume mit relativ einheitlicher Zellgröße beschränkt.

Sims und Khunniteekool (1994) analysierten die Zellstruktur eines EVA-Schaums (Dichte: 0,038 g/cm³) anhand von sechs Lichtmikroskopie-Bildern, die an unterschiedlichen Stellen im Schaum aufgenommen wurden. Bei lichtmikroskopischen Bildern muss darauf geachtet werden, dass auf Grund der Wellenlänge des sichtbaren Lichts von 400 bis 800 nm das maximale optische Auflösungsvermögen eines klassischen Lichtmikroskops auf rund 0,2 µm innerhalb der Bildfläche begrenzt ist (Heilemann & Sauer, 2010; Michler, 1992). Demzufolge können Strukturen, die enger als 200 nm beieinander liegen, nicht scharf voneinander getrennt werden (Trepte, 2006). Für die Berechnung der mittleren Zellgröße wurden jeweils fünf Referenzlinien durch das Mikroskopie-Bild gezogen, die Anzahl der von der entsprechenden Linie geschnittenen Zellen ermittelt und durch die Länge der Linie dividiert. Zusätzlich wurde die Zellgrößenverteilung durch Bestimmung des Abstandes zwischen zwei benachbarten Zellwänden entlang der Referenzlinie unter Berücksichtigung des Vergrößerungsfaktors ermittelt. Der Zelldurchmesser bzw. die Zellgröße ließ sich nach ASTM D 3576-04 näherungsweise wie folgt berechnen (Gleichung 14):

$$d = u * 1,623 \quad (14)$$

mit u: Zellsehnenlänge [mm] und d: mittlerer Zelldurchmesser [mm]

Eine bereits vorangegangene Arbeit zeigte, dass diese Methode mit der Bildanalysemethode anderer Autoren übereinstimmte (Sims & Khunniteekool, 1994). Es wurde allerdings darauf hingewiesen, dass nur eine scheinbare Zellgröße ermittelt wurde, da die Zellen sehr selten direkt mittig, sondern zufällig geschnitten wurden und damit nicht explizit von Ecke zu Ecke bzw. Ober- zu Unterkante gemessen wurde. Außerdem sollten die Zellen kugelförmig und möglichst von einheitlicher Zellgröße sein. Sims und Khunniteekool (1994) analysierten rund 400 Zellen für jeden Schaum, was als repräsentative Menge für die Zellstruktur beurteilt wurde. Diese Anzahl an Zellen wurde ebenfalls bei Rodríguez-Pérez und De Saja (2000) an geschlossenzelligen Polyolefin-Schäume untersucht.

Obwohl diese Methode sehr einfach durchzuführen ist, ist sie auf Grund des Zeitaufwands beim Zählen einer größeren Zellanzahl insbesondere in polydispersen Schäumen limitiert (Sims & Khunniteekool, 1994). Deshalb bieten computergestützte Bildanalysemethoden, die im Stande sind automatisch hunderte Zellen zu messen und dabei Zellgrößen und deren Verteilungen zu bestimmen, einen deutlichen Zeitvorteil (Lewis et al., 1996; Michler, 1992). Zellgrößenverteilungen von Schaumstoffen können computergestützt beispielsweise mit dem PORE!SCAN-System der Firma Goldlücke Ingenieurleistungen zeitnah und mit geringem Geräteaufwand untersucht werden (Kreis & Goldlücke, 2009). Für die Analyse der Schaumstruktur werden mittels PORE!SCAN-Software die Kanten zwischen Pore und Matrixmaterial an lichtmikroskopischen Aufnahmen segmentiert, wobei die Grenzlinie zwischen Zelle und Zellsteg festgelegt und markiert wird. Anschließend wird jeder Bildpixel entweder einer Zelle oder dem Matrixmaterial zugewiesen. Ein Zellsteg wird über zwei Linien detektiert, die sich bis auf einen Abstand von einem Pixel von beiden „Seiten“ annähern (Abbildung 25).

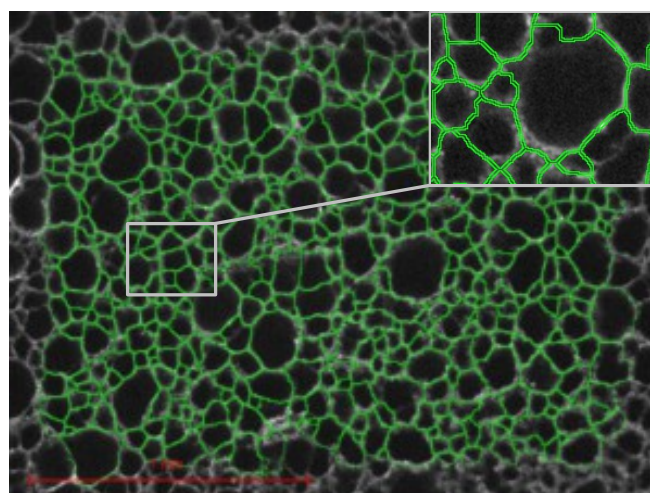


Abbildung 25: Analyse eines EVA-Schaums mittels PORE!SCAN

Die Kantensegmentierung erfordert einen ausreichenden Kontrast, der bei ungefärbten Schaumstoffen über die Einfärbung mittels Rußspray erhöht wird (Sims & Khunniteekool, 1994). Nach dem Erkennen und Vermessen der Zellen, wird die Zellstruktur rekonstruiert und werden die gewünschten Parameter berechnet. Der gebräuchliche Bereich analysierter Zellgrößen liegt bei rund $10 \mu\text{m}^2$ für PUR-Schäume (Kreis & Goldluecke, 2009). Die Auswertung der Zellgröße erfolgt über den äquivalenten Zelldurchmesser d_c (15), wobei die Grenzwerte von minimaler und maximale Zellfläche für die Auswertung erfahrungsgemäß zwischen 400 bis $1 \cdot 10^{16} \mu\text{m}^2$ festgelegt werden.

$$d_c = 2 * \sqrt{\frac{A_i}{\pi}} \quad (15)$$

mit: Zellfläche A_i [μm^2]

Eine weitere Methode zur optischen Aufnahme der zellulären Struktur ist die Rasterelektronenmikroskopie (REM). Diese ist ebenso wie die Lichtmikroskopie auf die Erfassung einer 2-D-Probenoberfläche beschränkt, wobei das Auflösungsvermögen der REM rund zehnmal höher ist als das eines Lichtmikroskops (Elmoutaouakkil et al., 2003). Bei Beschleunigungsspannungen von 50 kV liegt dieses bei $< 10 \text{ nm}$.

Eine 3-D-Analyse der Schaumstruktur bietet die 3-D-Mikro-Computertomographie, kurz 3-D-Mikro-CT (Abbildung 26). Hierbei wird das Objekt während der Messung um 360° gedreht und dabei mindestens 180 zweidimensionale Röntgen-Projektionen aufgenommen. Mit Hilfe mathematischer Rückprojektions-Algorithmen werden die einzelnen Schnittebenen rekonstruiert und zu einem 3-D-Datensatz zusammengefasst (Lim & Barigou, 2004). Das rekonstruierte 3-D-Modell kann in jeder Höhe und Richtung aufgeschnitten werden, um einen Blick auf die innere Struktur zu erhalten. Aus dem rekonstruierten 2-D-Schnittbild können

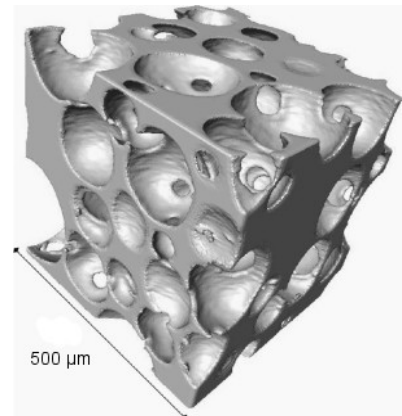


Abbildung 26: Analyse einer porösen Struktur mittels 3-D-Mikro-CT (Lim & Barigou, 2004)

mittels entsprechender Software quantitative 2-D-Informationen wie Zellanzahl, mittlerer Zelldurchmesser und relative Zellfläche entnommen werden (Lim & Barigou, 2004). Anhand des 3-D-Modells kann man 3-D-Parameter wie Zellvolumenanteil, Verhältnis von Zelloberfläche zu -volumen und Grad an Anisotropie erhalten. Es wurde darauf hingewiesen, dass das 3-D-Bild mehrere tausend Zellen umfassen kann, sodass zuverlässige statistische Aussagen gegeben werden können (Fischer et al., 2009; Godehardt et al., 2005).

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen neben der hohen Auflösung mit bis zu $5 \mu\text{m}$ pro Pixel und der dreidimensionalen Erfassung des Probekörpers darin, dass es sich um ein zerstö-

rungsfreies Verfahren handelt, bei dem die interne Mikrostruktur in ihrem Ausgangszustand untersucht werden kann (Roux et al., 2008). Auf Grund der dreidimensionalen Erfassung des Probekörpers entfällt eine aufwändige Probenpräparation der Probenoberfläche wie bei anderen mikroskopischen Analyseverfahren (Lim & Barigou, 2004). Die Vergrößerung ist durch das Verhältnis der Abstände von Strahlenquelle zu Probe bzw. Detektor abhängig und liegt im Bereich von 10- bis 120-fach. Der Nachteil dieser Analysemethode besteht allerdings darin, dass es ein sehr aufwändiges Verfahren ist, das dementsprechend sehr zeit- und kostenintensiv ist (Kreis & Goldlücke, 2009; Fischer et al., 2009).

Laut Fischer et al. (2009) sind Zellgrößen, die mittels REM oder anderen 2-D Analysemethoden ermittelt wurden, grundsätzlich kleiner als Zellgrößen, die mittels Mikro-CT analysiert wurden, da nicht der reale Zelldurchmesser, sondern der Durchmesser von unregelmäßig angeschnittenen Zellen (2-D-Schnitt) abgebildet wird. In ihrer Untersuchung an drei unterschiedlich dichten PVC-Schäumen zeigten sich beim Vergleich von Mikro-CT (3-D-Analyseverfahren) und REM (2-D-Analyseverfahren) Differenzen von bis zu 9 % für den mittleren Zelldurchmesser (Abbildung 27).

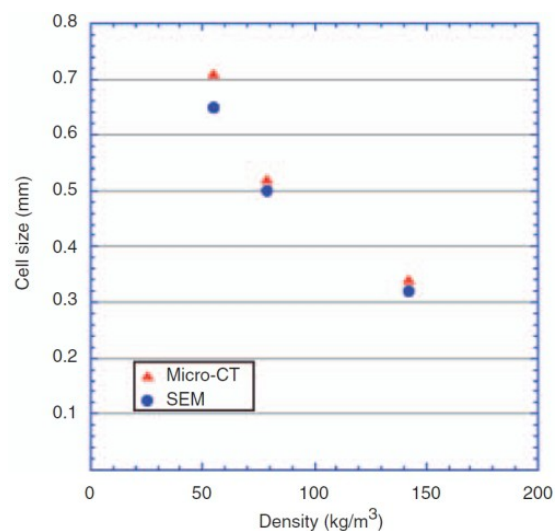


Abbildung 27: Vergleich REM und Mikro-CT (Fischer et al., 2009)

Weitere Techniken, um Schaumstrukturen dreidimensional zu analysieren, wie beispielsweise die konfokale Mikroskopie und die Magnetresonanztomographie (MRT) werden als weniger geeignet angesehen. Bei der konfokalen Mikroskopie liegt die Eindringtiefe, die abgebildet werden kann, in der Größenordnung eines einzelnen Zelldurchmessers, sodass diese Methode auf Untersuchungen der Oberfläche des Materials limitiert ist. Der Nachteil der MRT liegt im erforderlichen Kontrast, der beispielsweise durch inkompressible Flüssigkeiten, mit denen der Schaum gefüllt wird, erhöht wird. Dieses Befüllen bewirken allerdings eine enorme Veränderung des Schaums, sodass die MRI als ungeeignet für die Analyse insbesondere von geschlossenzelligen Schäumen angesehen wird (Elliott et al., 2002).

Skochdopole und Rubens (1965) untersuchten das σ - ϵ -Verhalten von zwei LDPE-Hartschäumen ähnlicher Schaumdichte, aber unterschiedlichen Zellendurchmessers. Der Übergang zum Versagensbereich, der mit dem Ausknicken der Zellwände in Verbindung gebracht wird (Gibson & Ashby, 2001), war dabei für den großzelligen Schaum deutlich ausgeprägter im Vergleich zum kleinzelligen Schaum (Abbildung 28). Dies ließ darauf schließen,

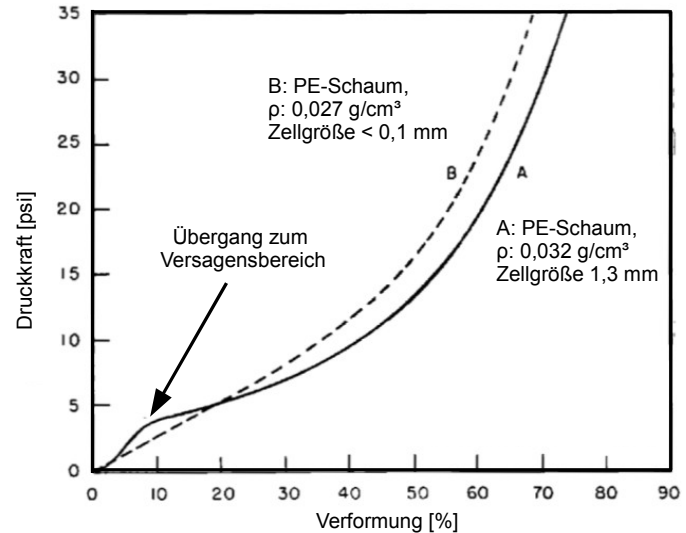


Abbildung 28: σ - ϵ -Kurven zweier PE-Schäume ähnlicher Dichte, aber unterschiedlicher Zellgröße (Skochdopole & Rubens, 1965)

dass die Ausbildung dieses Bereichs von der Größe der Zellen abhängig war.

Sowohl Fischer et al. (2009) als auch Bureau und Gendron (2003) kritisierten am Modell von Gibson und Ashby (2001) die fehlende Berücksichtigung der Schaumstruktur, da dieses nur die relative Dichte und Steifigkeit der Polymerphase beinhaltet. In ihrer Untersuchung analysierten Bureau und Gendron (2003 & 2005) geschlossenzellige PS-Schäume gleicher Schaumdichte, aber unterschiedlicher Zellgrößenverteilungen (Zelldurchmesser im Bereich von 75 bis 250 μm) und führten bei ihren Modellberechnungen den Gefügeparameter ρ/d als Verhältnis von Schaumdichte zu mittlerem Zelldurchmesser ein. Es zeigte sich eine direkt proportionale Zunahme der Versagensspannung mit steigendem Gefügeparameter (Abbildung 29). Bei gleicher Schaumdichte bedeutet dies eine zunehmende Versagensspannung bei abnehmendem Zelldurchmesser, was demnach die Vorgehensweise der Autoren bestätigte.

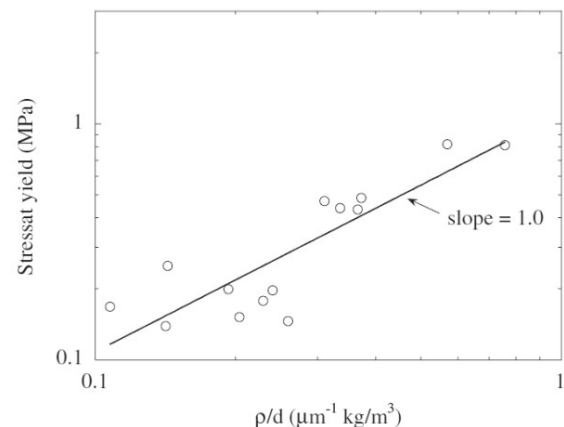


Abbildung 29: Zusammenhang von Gefügeparameter und Versagensspannung, $v = 2,5 \text{ mm/s}$ (Bureau & Gendron, 2003)

Saha et al. (2005) untersuchten zwei geschlossenzellige PVC-Schäume gleicher Schaumdichte ($0,13 \text{ g/cm}^3$), aber unterschiedlicher Mikrostruktur (Zellgrößenunterschied von rund 40 %, Abbildung 30). Sie ermittelten eine 15 % höhere Maximalspannung für den kleinzelligen

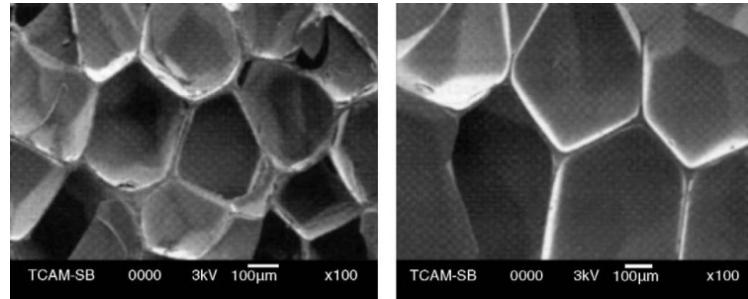


Abbildung 30: REM-Aufnahmen von PVC-Schäumen unterschiedlicher Mikrostruktur; links: kleinzelliger Schaum HD130, rechts: großzelliger Schaum H130 (Saha et al., 2005)

gen Schaum gegenüber dem großzelligem, wobei beide Materialien eine nahezu identische Anfangssteifigkeit aufwiesen. Demzufolge neigten geringere Zellgrößen weniger zum Ausknicken, was sich in dargestelltem Versuch in höheren Maximalspannungen widerspiegelte.

Boix et al. (2009) untersuchten geschlossenzellige EPS-Schäumen gleicher Schaumdichte ($0,09 \text{ g/cm}^3$), aber unterschiedlicher Zellgröße. Dabei waren 60 % der Zellen des Schaummaterials B rund zehnmal kleiner - mit kürzeren und dünneren Zellwänden - als bei Schaum A. Für den kleinzelligen Schaum konnte sowohl ein höherer E-Modul und ein höheres Versagensplateau gegenüber dem großzelligen Schaum festgestellt werden (Abbildung 31). Bouix et al. (2009) begründeten dies darin, dass kleinere Zellen weniger zum Ausknicken neigten als größere.

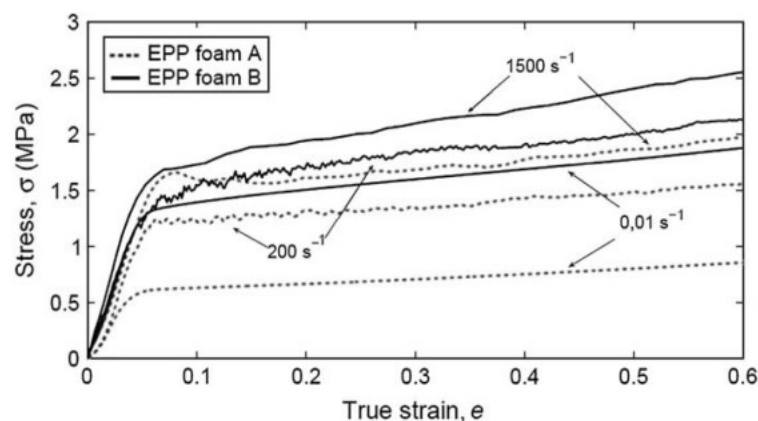


Abbildung 31: σ - ϵ -Kurven zweier PP-Schäume gleicher Dichte, aber unterschiedlicher Zellgröße; foam A: großzellig, foam B: kleinzellig (Bouix et al., 2009)

In den vorhergehenden Literaturstellen wurde die Abhängigkeit des Schaum-Verformungsverhaltens von der Zellgröße bzw. vom Zelldurchmesser bei konstanter Schaumdichte beschrieben. Nichtsdestoweniger wurde in der Literatur oft ein Zusammenhang von Schaumdichte und Zelldurchmesser sowie weiteren Parametern wie Zellwanddicke und Zellanzahl untersucht, was verschiedene Autoren wie folgt beschrieben:

Lin (1997) konnte bei der Analyse von drei PVC-Schäumen unterschiedlicher Dichte ($\rho = 0,03$ bis $0,08 \text{ g/cm}^3$) eine Zunahme der Zellwanddicken mit steigender Schaumdichte ermitteln. Die Zellwanddicken wurden dabei mittels Rasterelektronenmikroskopie analysiert. Klempner und Aseeva (2004) untersuchten den gegenteiligen Grenzfall und stellten mit abnehmender Schaumdichte eine Zunahme der Zellgröße bzw. eine

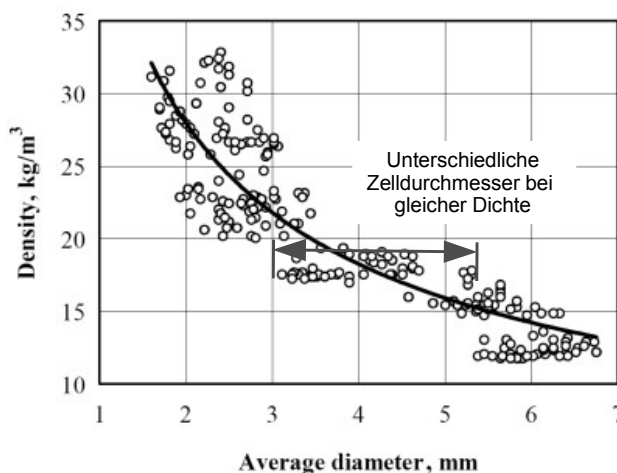


Abbildung 32: Zusammenhang von Schaumdichte und mittlerem PS-Partikeldurchmesser (Vaitkus et al., 2006)

Abnahme der Zellwanddicke fest. Für Viot et al. (2005) bewirkte eine höhere Schaumdichte entweder eine Zunahme der Zellwanddicke oder eine Abnahme der Zellanzahl. Für EPS-Schäume konnten Vaitkus et al. (2006) einen degressiven Zusammenhang von Dichte und dem mittleren Durchmesser der Polystyrolpartikel ermitteln (Abbildung 32). Aus dieser Grafik wird zudem deutlich, dass bei gleicher Schaumdichte unterschiedliche Zelldurchmesser ermittelt werden können, was in den anfangs genannten Literaturstellen analysiert wurde.

Zelligkeit und Querausdehnung (Poissonzahl)

Zelluläre Polymere können sowohl geschlossen- als auch offenzellig sein (Abbildung 33), was mit dem Begriff „Zelligkeit“ beschrieben wird. In offenzelligen Strukturen sind die Zellwände von Durchbrüchen durchsetzt, sodass die Gasphase aus Luft besteht, wohingegen in geschlossenzelligen Schäumen die isolierten, gasgefüllten Zellen zusätzlich Wasserstoff, Kohlendioxid etc. beinhalten können.

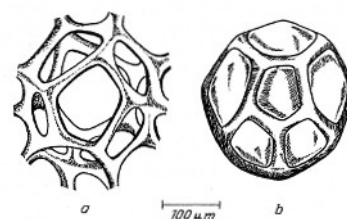


Abbildung 33: a: Offene Zelle; b: Geschlossene Zelle (Klempner & Aseeva, 2004)

Unter Belastung strömt in offenzelligen Schäumen das Gas durch die „Kanäle“ der Matrix, wohingegen in geschlossenzelligen Schäumen entweder die Zellen unter Druck verformt werden (Luftvolumen konstant) oder die in den Zellen eingeschlossene Luft komprimiert wird (Luftvolumen kompressibel) (Vaitkus et al., 2006). Ein gemischtzelliger Schaumstoff beinhaltet sowohl isolierte als auch verbundene Zellen, wobei die chemische Zusammensetzung der Polymerphase und die Prozessbedingungen bestimmen, ob eine Schaumstruktur vorherrschend geschlossen- oder offenzellig ist. Je nach Anteil der offenen Zellen ergeben sich unterschiedliche physikalische Eigenschaften für geschäumte Polymere (Klempner & Aseeva, 2004). Offenzellige Schäume, die auch als Schwämme bezeichnet werden, können im Extremfall nur aus Zellstegen bestehen (Rohde, 02.2005).

Aufschluss über die Zelligkeit eines Schaums kann man anhand von Verformungsprüfungen erhalten, die an - in Wasser lagerndem - Schaum durchgeführt werden. Werden unter Belastung keine Luftbläschen sichtbar, deutet dies auf eine Geschlossenzelligkeit hin, wohingegen ein Entweichen des Gases auf einen offenzelligen Schaum hinweist.

Ramsteiner et al. (Ramsteiner et al., 2001) verwendeten die genannte Methode zur Beurteilung der Zelligkeit von PS-Schäumen. Die Schäume lagerten in Wasser und wurden dabei quasi-statisch verformt. Es konnte festgestellt werden, dass je nach Dichte des Schaums erste Luftbläschen gegen Ende des linear-elastischen Bereichs bei rund 3 bis 10 % Verformung an der Oberfläche sichtbar wurden.

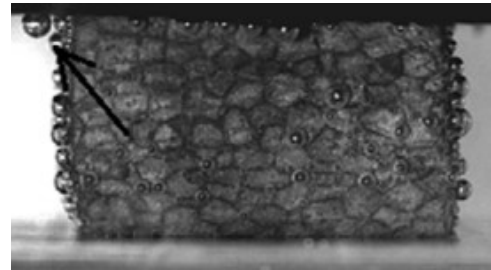


Abbildung 34: Luftbläschen-Austritt bei quasi-statischer Verformung von EPS bei 40 % Deformation (Bouix et al., 2009)

Mit zunehmender Verformung entwichen weitere Luftblasen, sodass für diese Schäume deutlich wurde, dass die Offenzelligkeit erst ab einer bestimmten Verformung auftrat. Auch Bouix et al. (2009) verwendeten die erläuterte Methode, um die Zelligkeit von EPS-Schäumen zu analysieren (Abbildung 34).

Skochdopole und Rubens (1965) untersuchte den Einfluss der Zelligkeit auf das Kraft-Verformungs-Verhalten eines Schaums. Dabei zeigte sich an PE-Schäumen gleicher Dichte, aber unterschiedlichem Anteil an offenen Zellen, dass mit abnehmendem Anteil an offenen Zellen die Anfangssteifigkeit (E-Modul) zunahm und damit der Übergang von Anfangsmodul zu Platteaubereich zunehmend deutlicher wurde (Abbildung 35).

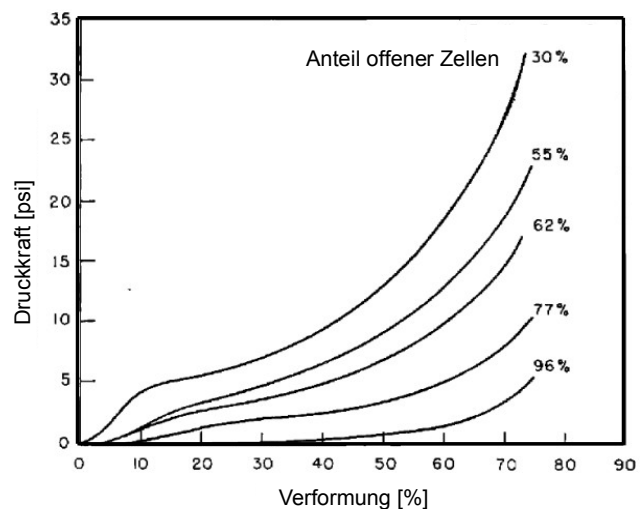


Abbildung 35: Kompressionskurven für PE-Schaum unterschiedlicher Zelligkeit (Skochdopole & Rubens, 1965)

Ouellet et al. (2006) untersuchten unter quasi-statischer Belastung ein offenzelliges HD-PE-Schaummaterial und ein geschlossenzelliges EPS-Schaummaterial. Dabei stellten sie fest, dass die σ - ϵ -Kurve des HDPE-Schaums ein horizontales Spannungsplateau aufwies, wohingegen die Kurve des geschlossenzelligen EPS-Schaums einen Anstieg der Spannung im Versagensbereich aufzeigte. Dieses Verhalten begründeten sie in der Kompression der eingeschlossenen Luft. Dieses Verhalten bestätigte sich auch bei Song und Shisheng (2003) für einen EVA-Schaum. Laut Rodríguez-Pérez und De Saja (2000) hatte der Gasdruck in den geschlossenen Zellen einen maßgeblichen Einfluss auf das mechanische Antwortverhal-

ten von Polyolefin-Schäumen niedriger Dichte, da die in den Zellen eingeschlossene Luft die Steifigkeit des Schaums erhöhte. Gibson und Ashby (2001) erklärten, dass dieser Einfluss erst für elastische Schäume mit einer relativen Dichte $R < 0,1$ relevant wurde. Mills und Rodriguez-Perez (2001) erläuterten noch präziser, dass das Druck-Verformungsverhalten geschlossenzelliger LDPE-Schäume mit Schaumdichten $< 0,03 \text{ g/cm}^3$ von der Komprimierung des in den Zellen eingeschlossenen Gases dominiert wurde.

Das Verformungsverhalten eines geschlossenzelligen EVA-Schaums erklärte Kleindienst (2003) wie folgt (Abbildung 36): „Eine äußere Kraft bewirkt eine Verformung des Schaums, in dem die Poren von EVA-Material dicht umschlossen sind und kein Gas entweichen kann. Die eingeschlossene Luft wird komprimiert und bewirkt einen Druckanstieg. Da bei weicheren Schäumen das Verhältnis von Feststoff zu Luft kleiner ist als bei

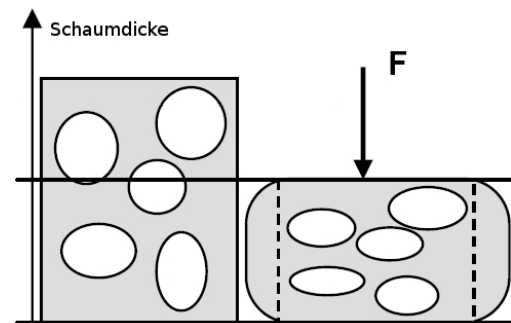


Abbildung 36: Schematische Darstellung der Verformung eines Schaums (Kleindienst, 2003)

härteren Schäumen, ist demzufolge bei weicheren Schäumen die Verformung unter gleicher Kraft größer. Sobald die von außen einwirkende Kraft einen bestimmten Betrag überschreitet, wölbt sich der inkompressible EVA-Probekörper nach außen, wobei die Steifigkeit sprunghaft ansteigt, da die maximale Kompression des Gases erreicht ist“. Aus dieser Aussage wurde zum einen deutlich, in wie fern das eingeschlossene Gas am Deformationsprozess beteiligt war und zum anderen, dass sich ein Auswölben des Probekörpers in einer Veränderung der Kraft-Verformungs-Kurve widerspiegelte. Für einen geschlossenzelligen Schaum wird dieses, von Kleindienst (2003) erläuterte Auswölben (Querausdehnung) anhand der Poissonzahl ermittelt, die über das Verhältnis von Breiten- zu Längenänderung eines Probekörpers unter Druckbelastung definiert wird (Gleichung 16).

$$\nu = \frac{(\Delta b/b)}{(\Delta l/l)} \quad (16)$$

mit b: Breite [mm]

 l: Länge [mm]

Bei Werten $< 0,5$ nimmt das Volumen unter einer Druckbelastung ab (Verdichtung), wohingegen bei einem Wert von 0,5 das Volumen eines Körpers konstant bleibt. Findet keine Querausdehnung (Ausbeulen) des Materials statt, so gilt $\nu = 0$ (Verdejo & Mills, 2004b). Typische Werte der Poissonzahl liegen zwischen 0,1 bis 0,4.

Solorzano et al. (2007) untersuchten das Verformungsverhalten bzw. die Querausdehnung eines geschlossenzelligen EVA-Schaums („CO20“ mit einer Dichte von $0,04 \text{ g/cm}^3$ und 19 % Vinylacetat-Anteil) anhand eines Fallgewichtstests und gleichzeitiger Bildanalyse. Auf dem Schaum wurde ein Punktemuster aufgebracht, sodass anhand der horizontalen Verschiebung des Punktemusters zu unterschiedlichen Verformungen eine Quer-

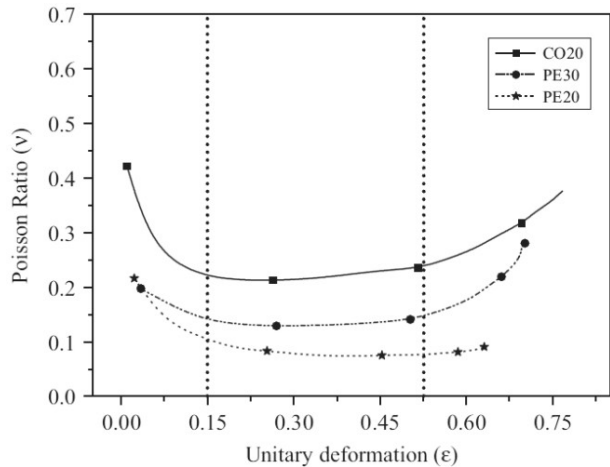


Abbildung 37: Poissonzahl in Abhängigkeit von der Verformung (Solorzano et al., 2007)

ausdehnung und damit eine Veränderung der Poissonzahl analysiert wurde. Dabei zeigte sich, dass sich die Poissonzahl in Abhängigkeit der Druckverformung in drei Bereiche einteilen ließ (Abbildung 37): Bei geringer Verformung war die Poissonzahl hoch (0,42), wobei sich deren Wert mit steigender Verformung verringerte. Für Verformungen zwischen 15 bis 50 % lag diese annähernd konstant auf geringem Level ($\sim 0,22$), wobei sie mit zunehmender Verformung wieder anstieg ($\sim 0,32$). Solorzano et al. (2007) stellten demzufolge fest, dass in dem Bereich, wo der Hauptbeitrag am Schaumverhalten von der Gaskomprimierung verursacht wurde, die Poissonzahl geringer war. Die Aussage, dass eine Änderungen der Poissonzahl eine Änderung des Verformungsmechanismus' und damit des Verlaufs der σ - ϵ -Kurve bedingt, bestätigte sich bei Mills und Gilchrist (1997b) an einem PS-Schaum ($\rho: 0,02 \text{ g/cm}^3$).

Im Gegensatz dazu zeigte sich bei der Analyse von LDPE-Schäumen ($\rho: 0,02$ bis $0,07 \text{ g/cm}^3$) eine durchgehend konstante Verdichtung des Schaums unter Druckbelastung und damit eine Poissonzahl von Null. Hierbei wurde die Änderung der Querausdehnung in Abhängigkeit von der Verformung mit Hilfe eines mechanischen Messfühlers bestimmt (Mills & Gilchrist, 1997b). Zhang et al. (1998) konnten für einen PP-Hartschaum ($\rho: 0,005 \text{ g/cm}^3$) unter sequentieller Druckverformung ebenso eine Poissonzahl von Null feststellen. Auch Viot et al. (2005) ermittelten eine Poissonzahl von Null für einen geschlossenzelligen PP-Schaum ($\rho: 0,10 \text{ g/cm}^3$) sowohl bei quasi-statischer als auch dynamischer (Verformungsrate: 100 1/s) Verformung.

Strukturveränderungen

Verschiedene Autoren untersuchten die zelluläre Schaumstruktur während gleichzeitiger Verformung bei unterschiedlicher Vergrößerung. Über die Analyse der Strukturveränderungen im Schaum versuchten sie Aufschluss über das mechanische Verformungsverhalten und Verformungsmechanismen im Schaum zu erhalten. Dies wird nachfolgend näher erläutert:

Weaire und Fortes (1994) erklärten, dass die Kraft-Verformungs-Kurve vieler Schaummaterialien einer Idealkurve mit horizontal verlaufendem Versagensbereich und ansteigendem Anfangs- und Endbereich sehr nahe kommt (Abbildung 7). Dies ist laut Gibson und Ashby (2001) für einen idealen Schaum - bestehend aus Zellen einheitlicher Form und Größe – charakteristisch. Im Gegensatz dazu konnte aber auch ein zunehmender Anstieg der Spannung im Versagensbereich für verschiedene Schäume festgestellt werden, was Weaire und Fortes (1994) auf Inhomogenitäten der Zellfestigkeit begründeten. Das Versagen bzw. Zusammenbrechen der Zellwände fand dabei in Form einzelner Deformationsbanden statt, wobei die erste Deformationsbande in der Schicht mit der geringsten Dichte bzw. größeren Poren auftrat. Das Versagen setzt sich dabei von einer Zelle an die benachbarten Zellen innerhalb einer Bande, die senkrecht zur Belastungsrichtung verläuft, fort. Weaire und Fortes (1994) vergleichen dies mit dem Verformungsverhalten von dicht gepackten Strohhalmen.

Die zitierte Literaturstelle (Weaire & Fortes, 1994) enthält allerdings nur eine beispielhafte Abbildung des Verformungsverhaltens anhand von Strohhalmen und keine konkreten Aufnahmen eines Schaims bzw. von dessen Versagensmechanismus' (Abbildung 38).

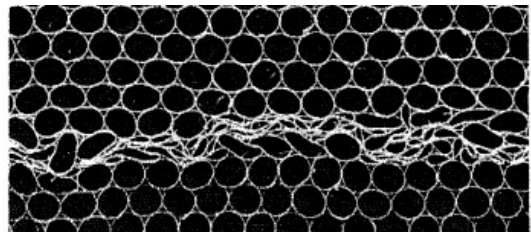


Abbildung 38: Bande von kollabierten Strohhalmen (Weaire & Fortes, 1994)

Ein vergleichbares Verhalten eines inhomogenen Ausknickungsprozesses der Zellen konnten Ramsteiner et al. (2001) an einem PS-Schaum bei einer Verformung um 46 % beobachten. Höher verdichtete Bereiche bildeten sich senkrecht zur Belastungsrichtung aus – mit nahezu undeformierten Regionen dazwischen. Die Belastungsrichtung des in Abbildung 39 dargestellten Schaims verlief dabei vertikal. Ein Zusammenhang zum Spannungs-Verformungs-Verhalten wurde nicht untersucht.

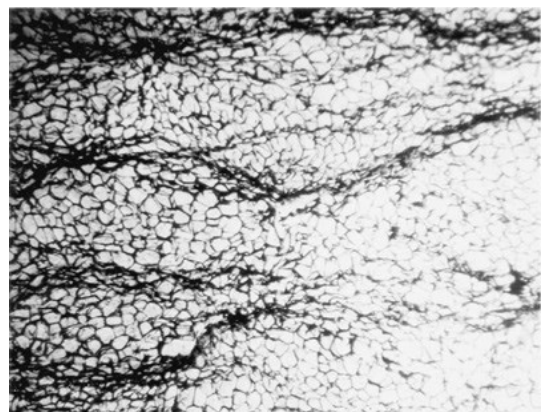


Abbildung 39: Inhomogener Deformationsprozess von PS-Schaum (Ramsteiner et al., 2001)

Viot et al. (2005) analysierten das Verformungsverhalten von PP-Schäumen bei einer Verformungsrate von 100 s^{-1} , während die Verformung des Schaums mittels High-Speed Kamera aufgezeichnet wurde (2600 Einzelbilder pro Sekunde bei einer Auflösung von $128 \times 512 \text{ px}$). Das Schaummaterial bestand aus agglomerierten Kügelchen von rund 2 mm Durchmesser, die wiederum aus geschlossenen Zellen mit einer Größe von rund $60 \mu\text{m}$ zusammengesetzt waren. Dabei wurde – wie auch schon in den voran gegangenen Literaturstellen – eine starke Heterogenität des Verformungsbereiches festgestellt: Zunächst begann eine dünne Schicht im Schaummaterial zu versagen und sich von dort ausgehend in der Umgebung auszubreiten. Der Ausgangspunkt dieser Versagensschicht war zufällig, wobei die Orientierung grundsätzlich senkrecht zur Belastungsrichtung erfolgte. Ein Zusammenhang von Spannungs-kurve zur Strukturveränderung wurde nicht ermittelt.

Ridha und Shim (2008) untersuchten das Verformungsverhalten eines PUR-Hartschaums unter Druckverformung mittels Mikro-Computertomographie ($\mu\text{-CT}$). Dieser Schaum setzte sich aus geschlossenen Zellen zusammen, wobei die Zellwände aus dünnen Membrane bestanden und die Zellstege die Zellkanten definierten. Unter Druck begannen die Zellstege sich zu verbiegen bzw. zu kontrahieren, um im Anschluss plastisch zu verbiegen und auszuknicken (Abbildung 40). Weiterhin konnte festgestellt werden, dass sich Stege - nahe dem Verbindungsbereich zur Nachbarzelle - kaum verbogen, da in diesem Bereich die Stege dicker und steifer waren. Aussagen zu einem Zusammenhang mit dem Spannungs-Verformungs-Verhalten des Schaums wurden nicht gegeben.

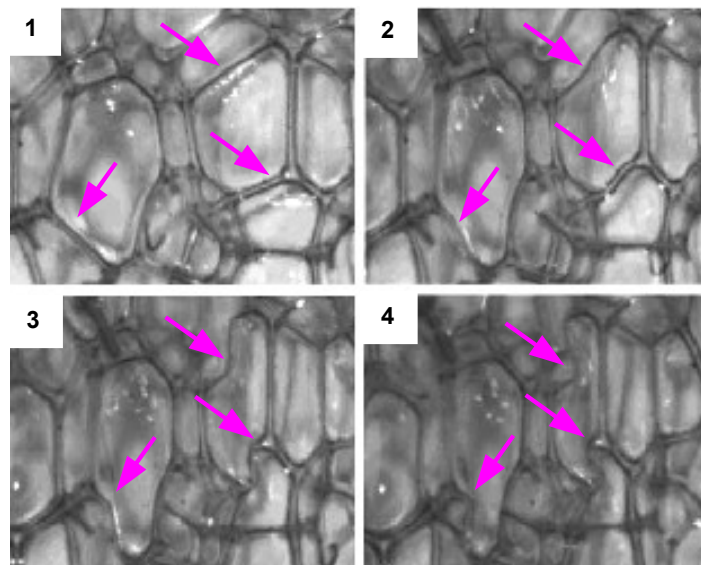


Abbildung 40: $\mu\text{-CT}$ -Aufnahmen einer Druckverformung, Belastungsrichtung horizontal (Ridha & Shim, 2008)

Elliott et al. (2002) untersuchten die Morphologie von offenzelligen PUR-Schäumen mittels 3-D-Mikro-CT bei Druckverformungen von 0 bis 80 % (Abbildung 41 bis 43). Dabei zeigte sich zunächst ein homogener Verformungsprozess bis zu einer Verformung von bis zu 6 %,

wobei sich die Zellstege geringfügig durchbogen (Abbildung 41). Im weiteren Verlauf wurde ersichtlich, dass sich nicht nur Zellstege deformierten, die senkrecht zur Belastungsrichtung ausgerichtet waren, sondern auch Zellstege in unterschiedlichen Winkeln zur Belastungsrichtung (Abbildung 42). Bei noch weiterer Verformung begannen einzelne Zellstege, die deutlich größer waren als die der unmittelbaren Nachbarzellen, auszuknicken – analog zu einem starken Steifigkeitsabfall der Kraft-Verformungs-Kurve (Abbildung 43). Elliot et al. (2002) folgerten deshalb, dass der Übergang zum Versagensbereich vielmehr durch ein zusammenwirkendes Ausknicken von Zellen innerhalb bestimmter Schaumbereiche beschrieben werden konnte und weniger durch ein Zusammenknicken von senkrecht zur Belastung ausgerichteter Zellstege. Bei rund 63 % Verformung begannen die Zellstege aneinander zustoßen, was als Übergang zur Verdichtungsphase angesehen wurde. Wie auch schon in den vorangegangenen Literaturstellen wurde festgestellt, dass das Verformungsverhalten von Schäumen ohne einheitliche Zellgröße im Versagensbereich von lokalen Verdichtungen in einzelnen Schichten gekennzeichnet war.

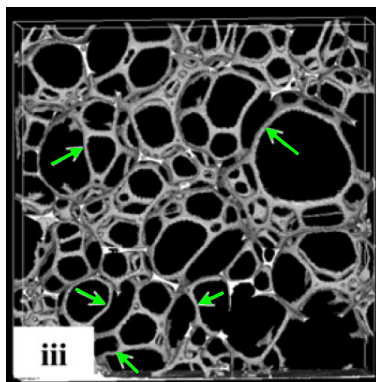


Abbildung 41: 4 % Verformung
(Elliott et al., 2002)

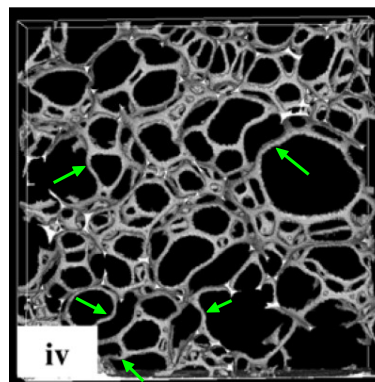


Abbildung 42: 10 % Verformung
(Elliott et al., 2002)

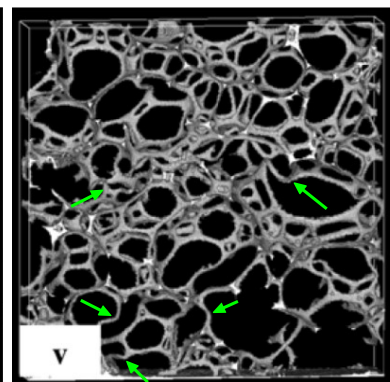


Abbildung 43: 23 % Verformung
(Elliott et al., 2002)

2.6.1.4 Gasphase: Zusammenfassung und Diskussion

In der Literatur wurde festgestellt, dass mit zunehmender Schaumdichte der E-Modul und die Versagensspannung anstiegen und die Verformung, bei der die Verdichtung des Materials einsetzte, abnahm. Des Weiteren zeigte sich in einer Literaturstelle ein nahezu horizontaler Verlauf der σ - ϵ -Kurve bei niedrigen Schaumdichten und eine Zunahme des Kurvenanstiegs mit steigender Schaumdichte im Versagensbereich. Im ausgewählten Modell ist die relative Dichte bereits berücksichtigt. Auch wenn sich in der Literatur keine Zusammenhänge von relativer Dichte und dem mechanischen Verformungsverhalten von Schäumen feststellen ließen, werden diese auf Grund des mathematischen Zusammenhangs von Schaumdichte und relativer Dichte ebenfalls erwartet.

Laut verschiedener Autoren wird der Parameter Härte weithin zur Beurteilung von Weichschäumen bzw. deren Stoßdämpfungsfähigkeit eingesetzt, obwohl sie diesen für ein ungenaues und grobes Maß halten. In der Literatur wurde oftmals ein linearer Zusammenhang von Härte und Schaumdichte festgestellt, sodass von einer Abhängigkeit des σ - ϵ -Verhaltens von der Härte auszugehen ist, obwohl kein Aussage zu diesem Zusammenhang in der Literatur gefunden wurde.

Innerhalb der Literatur konnte insbesondere eine Abhängigkeit des mechanischen Verformungsverhaltens des Schaums von der Zellgröße bzw. des Zelldurchmessers ermittelt werden, die sich wie folgt darstellt: Zum einen wurde der für Schäume charakteristische Übergang zum Versagensbereich, der mit dem Ausknicken der Zellwände in Verbindung gebracht wird, nur für einen großzelligen LDPE-Hartschaum (Zelldurchmesser rund 1,3 mm) erkennbar und nicht bei einem kleinzelligen Schaum (Zelldurchmesser $< 0,1$ mm). Eine weitere Autorenschaft ermittelte für einen kleinzelligen Schaum einen höheren E-Modul und ein höheres Versagensplateau im Vergleich zu einem großzelligen Schaum bei gleicher Dichte. In einer weiteren Untersuchung an PS-Schäumen zeigte sich bei zunehmendem Gefügeparameter p/d , der das Verhältnis von Schaumdichte zu mittlerem Zelldurchmesser beschreibt, eine Zunahme der Versagensspannung. Bei gleicher Schaumdichte bedeutet dies, eine zunehmende Versagensspannung bei abnehmendem Zelldurchmesser. Zusammenfassend lässt sich aus der Literatur folgern, dass kleinere Zellen stabiler sind und weniger zum Ausknicken neigen als größere, sodass höhere Spannungswerte erreicht werden. Demzufolge bildet die Zellgröße einen Einflussfaktor auf das mechanische Verformungsverhalten eines Schaums.

Bei den erläuterten Literaturstellen wurde die Zellgröße bei konstanter Schaumdichte untersucht. Oftmals wurden in der Literatur auch Untersuchungen zu dem Zusammenhang von zellulärer Struktur und Schaumdichte gefunden. Hierbei wurde mit steigender Schaumdichte eine Abnahme der Zellgröße, eine Zunahme der Zellwanddicken bzw. eine Abnahme der Zellanzahl ermittelt.

Die Zelligkeit lässt sich wie folgt erklären: Unter Belastung strömt in offenzelligen Schäumen das Gas durch die „Kanäle“ der Matrix, wohingegen in geschlossenzelligen Schäumen entweder die Zellen unter Druck verformt werden (Luftvolumen konstant) oder die in den Zellen eingeschlossene Luft komprimiert wird (Luftvolumen kompressibel) (Vaitkus et al., 2006). Aufschluss über die Zelligkeit eines Schaums kann man anhand von Verformungsprüfungen erhalten, die an - in Wasser lagernden - Schaum durchgeführt werden. Werden unter Belastung keine Luftbläschen sichtbar, deutet dies auf eine Geschlossenzelligkeit hin, wohingegen ein Entweichen des Gases auf einen offenzelligen Schaum hinweist.

In der Literatur zeigte sich die Abhängigkeit des mechanischen Schaum-Verformungsverhaltens von der Zelligkeit wie folgt: Für PE-Schäume gleicher Dichte, aber unterschiedlichem Anteil offener Zellen wurde mit abnehmendem Anteil der offenen Zellen eine Zunahme des E-Moduls und eine deutlichere Ausprägung des Übergangs von Anfangsanstieg zu Plateaubereich ermittelt. Beim Vergleich von geschlossen- und offenzelligen Schaummaterial konnte festgestellt werden, dass die Spannungs-Verformungs-Kurve des offenzelligen Schaums ein horizontales Spannungsplateau aufwies, wohingegen der geschlossenzellige Schaums einen Anstieg der Spannung im Versagensbereich aufzeigte. Dieses Verhalten wurde in der Kompression der eingeschlossenen Luft begründet, die demzufolge einen progressiven Verlauf der σ - ϵ -Kurve aufwies. Weitere Autoren äußerten, dass dieses Verhalten eines geschlossenzelligen Schaums sich insbesondere bei Schäumen niedriger Dichten zeigte bzw. dass der σ - ϵ -Verlauf eines niedrigdichten Schaums sogar von der Komprimierung der in den Zellen eingeschlossenen Luft im Versagensbereich dominiert wurde. Zusammenfassend wird deutlich, dass die Zelligkeit einen Einflussfaktor auf das mechanische Verformungsverhalten eines Weichschaums darstellt.

Die Querausdehnung eines Schaums wird über die Poissonzahl bestimmt, die über das Verhältnis von Breiten- zu Längenänderung unter Druckbelastung definiert ist. Es ließen sich unterschiedliche Aussagen zur Poissonzahl eines Schaums finden: Zwei Autorenschaften stellten eine Änderung der Poissonzahl in den unterschiedlichen Verformungsbereichen fest, die sie in einer Veränderung des Verformungsmechanismus' und damit der Spannungs-Verformungs-Kurve begründeten (Mills und Gilchrist, 1997b; Solorzano et al., 2007). Im Gegensatz dazu zeigte sich bei verschiedenen anderen Autoren eine zunehmende Verdichtung des Schaums unter Druckbelastung und damit eine gleichbleibende Poissonzahl von Null bei zunehmender Verformung. Dies deutet auf ein volumenkompressibles Verhalten der in den Zellen eingeschlossenen Luft hin. Dieses Verhalten gilt laut Gibson und Ashby (2001) als Voraussetzung für die Verwendung des gewählten Modells. Zeigt sich keine Querausdehnung für den gesamten Kurvenverlauf, so kann für die drei Verformungsbereiche das gewählte Modell angesetzt werden. Trifft dies nur für einen bestimmten Bereich wie beispielsweise den Versagensbereich zu, so kann nur für den Versagensbereich dieser Modellansatz verwendet werden.

Verschiedene Autoren untersuchten die zelluläre Struktur im Schaum bei gleichzeitiger Verformung, um über die Strukturveränderung Aufschluss über einen Verformungsmechanismus und/oder das mechanische Verformungsverhalten im Schaum zu erhalten. Grundsätzlich zeigte sich ein inhomogener Verformungsprozess, bei dem sich im Schaum höher verdichtete Bereiche – ausgehend in dünnen Schichten - senkrecht zur Belastungsrichtung ausbildeten.

ten. Weiterhin wurde festgestellt, dass dabei nicht nur senkrecht zur Belastungsrichtung ausgerichtete Zellen ausknickten, sondern auch Zellen, die in unterschiedlichen Winkeln zur Belastung ausgerichtet sind. Lediglich in einer Literaturstelle konnte an einem offenzelligen Schaum konkret analysiert werden, wie sich die unterschiedlichen Bereiche der Spannungs-Verformungs-Kurve in einer Veränderung des Verformungsmechanismus' der zellulären Struktur widerspiegeln: Im linear-elastischen Bereich bogen sich die Zellstege geringfügig durch, im Versagensbereich knickten einzelne Zellstege, die deutlich größer waren als die der unmittelbaren Nachbarzellen, aus und im Verdichtungsbereich begannen die Zellstege aneinander zu stoßen.

2.6.2 Einflüsse der Matrixphase

Fast alle Polymere können zu Schaummaterialien verarbeitet werden, sodass die Matrix von zellulären Polymeren aus Thermoplasten, Duroplasten, Elastomeren und auch thermoplastischen Elastomeren aufgebaut sein kann. Elastomere bilden die Matrixphase von den in dieser Arbeit relevanten, weichelastischen Schaumstoffen (Ehrenstein et al., 2003).

Das mechanische Verformungsverhalten von Elastomeren lässt sich – gleichfalls wie das von Schäumen - in drei charakteristische Bereiche unterteilen.

Das Elastomer besitzt zunächst eine Anfangssteifigkeit im so genannten linear-elastischen Bereich (Phase I, Abbildung 44). Sobald eine kritische Dehnung überschritten wird, setzen Gleitprozesse ein, bei denen sich die Kettensegmente in Belastungsrichtung ausrichten.

Dadurch verringert sich ein weiterer Anstieg an Spannung (Phase II,

Abbildung 44). Je nach molekularem Aufbau des Elastomers kommt es mit zunehmender Dehnung zur so genannten Dehnungskristallisation der Kettensegmente (Phase III, Abbildung 44), bei der sich das Elastomer auf Grund der ausgerichteten und teilweise kristallisierten Kettensegmente verfestigt, und damit die Spannung bis zum endgültigen Bruch erneut ansteigt (Ehrenstein, 1999). Da sich der Glasübergang von Elastomeren unterhalb der Raumtemperatur befindet, weisen die Kettensegmente bei Raumtemperatur eine hohe Beweglichkeit auf, sodass Verformungen von bis zu einigen hundert Prozent durch Kettenstreckungen möglich sind.

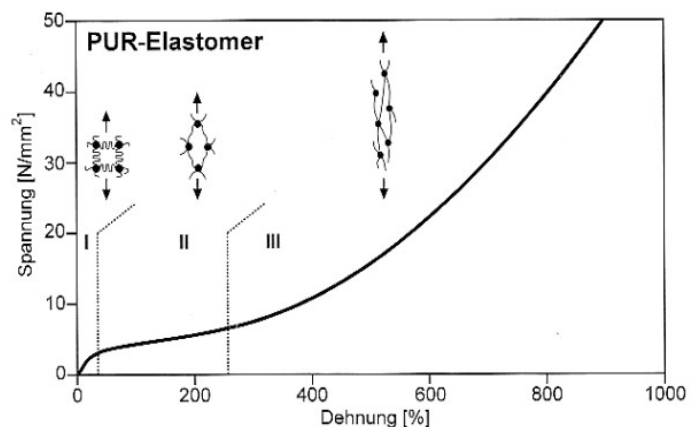


Abbildung 44: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines PUR-Elastomers (Ehrenstein, 1999)

2.6.2.1 Einfluss von chemischem Aufbau und Morphologie

Unterschiedliche Elastomer-Zusammensetzungen und damit ein unterschiedlicher chemischer Aufbau der Matrix resultieren laut Rodríguez-Pérez und De Saja (2000) in einer Veränderung des mechanischen Verhaltens der Matrix und damit des Schaums. Der chemische Aufbau der Polymerphase lässt sich anhand des Extinktionsspektrums der IR-Spektroskopie qualitativ analysieren (Menges et al., 2005).

Elastomere – als Matrixphase von weichelastischen Schäumen – zählen zu den viskoelastischen Materialien (Grellmann et al., 2005). Diese Viskoelastizität kann mittels Dynamisch Mechanischer Analyse (DMA) untersucht werden. Hierbei wird der Probekörper mit einer erzwungenen, sinusförmigen Verformungsfunktion (Kraft F) dynamisch belastet und das Verhalten der Antwortfunktion (Auslenkung x) analysiert (DIN 53513). Anhand des Phasenwinkels können viskose (Speichermodul) und elastische (Verlustmodul) Eigenschaften der Polymerphase bestimmt werden. Der Speichermodul ist dabei ein Maß für die Energie, die während jedes Zyklus gespeichert und zurück gewonnen wird, wohingegen der Verlustmodul ein Maß für die irreversibel in Wärme dissipierte Energie ist (Ferry, 1980). Als Verlustfaktor d wird das Verhältnis von Verlust- zu Speichermodul bezeichnet, der auch über den Tangens des Phasenwinkels ($\tan \delta$) berechnet wird. Er kennzeichnet damit die mechanische Dämpfung eines Materials (Ehrenstein, 1999).

Abbildung 45 zeigt eine schematische Darstellung typischer DMA-Kurven eines EVA-Schaums mit zwei charakteristischen Übergangsbereichen. Ab dem α -Übergang (Schmelzübergang) beginnen die kristallinen Bereiche zu schmelzen. Der α -Übergang des EVA-Copolymers lässt sich über den kleineren Peak des Verlustfaktors (Abbildung 45) bestimmen und befindet sich zwischen den Schmelztemperaturen der Homopolymere LD-Polyethylen (105 bis 120 °C) und Polyvinylacetat (35 bis 50 °C) (Arsac et al., 2000). Laut Rodríguez-Pérez und De Saja (2000) steigt die Schmelzübergangstemperatur von EVA mit zunehmender Kristallinität und damit abnehmendem Vinylacetat-Anteil an. Der β -Übergang (Glasübergang), der mit der Kettenbewegung (Erweichen) der amorphen Regionen in Verbindung gebracht wird, erscheint bei rund -25 °C, wobei dessen Peak-Intensität mit zunehmendem Vinylacetat-Anteil ansteigt (Verdejo, 10.2003). Im Glasübergangsbereich wird ein Maximum an innerer Reibung der Moleküle umgesetzt, sodass hier der Verlustmodul sein Maximum erreicht.

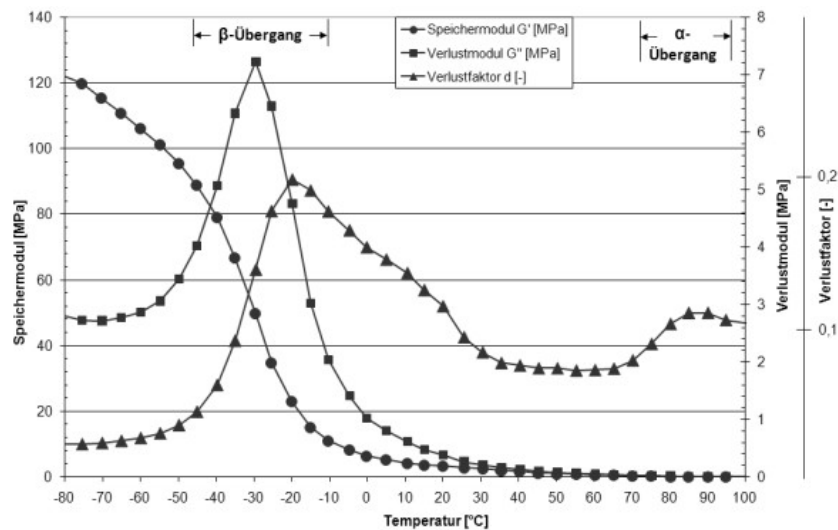


Abbildung 45: Verlauf von Speichermodul M' , Verlustmodul M'' und Verlustfaktor d eines Polymerschaums bei einer Frequenz von 1 Hz

Rodríguez-Pérez und De Saja (2000) untersuchten Polyolefin-Schäumen gleicher Dichte, aber unterschiedlicher Polymerphase mittels DMA. Dabei stellten sie fest, dass das unterschiedliche mechanische Verformungsverhalten der Schäume sich in einer unterschiedlichen Morphologie der Polymerphase (u.a. Kristallinität) begründete. Die Morphologie ist definiert als Erscheinungsbild übermolekularer Strukturen von Polymeren (Ehrenstein et al., 2003). Demzufolge stellt die Morphologie der Matrixphase einen Einflussfaktor auf das mechanische Verformungsverhalten des Schaums dar.

2.6.2.2 Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit

Die bereits erwähnte Viskoelastizität von Elastomeren führt dazu, dass sowohl die elastomere Matrix und demzufolge der Schaum von einer starken Zeitabhängigkeit geprägt sind (Ouellet et al., 2006; Rodríguez-Pérez et al., 2000). Dies spiegelt sich beispielsweise bei dynamischen Belastungen in einem von der Prüfgeschwindigkeit v bzw. der Verformungsrate $\dot{\epsilon}$ abhängigen σ - ϵ -Verhalten wider. Verformungsraten bis $0,01 \text{ s}^{-1}$ werden als quasi-statisch, ab 200 s^{-1} als „mittelmäßig“ und Raten über 1000 s^{-1} als „hoch“ bewertet (Bouix et al., 2009; Bludau, 2005).

Abbildung 46 zeigt das σ - ϵ -Verhalten eines Elastomers in Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit ein Anstieg von E-Modul und Versagensspannung und eine Abnahme der Verdichtungs- spannung ermittelt wurden (Dalrymple & Choi, 2007). Die nahezu symmetrischen Abstände zwischen den Kurven der hohen Verformungsgeschwindigkeiten deuten auf einen logarithmischen Zusammenhang hin.

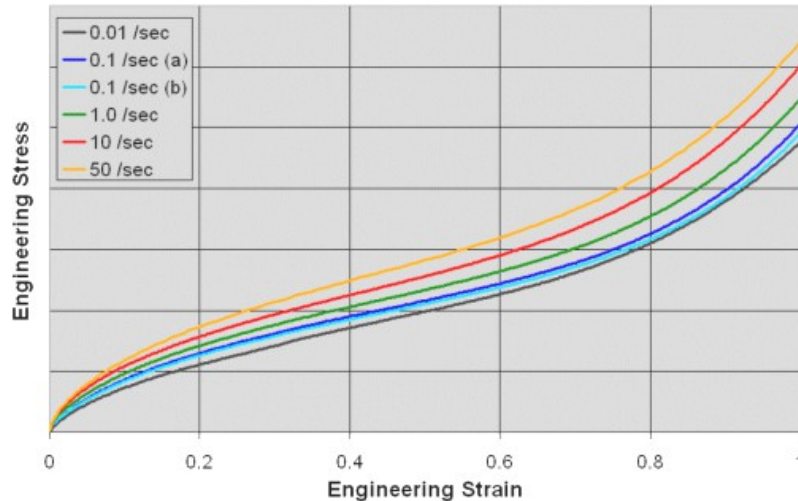


Abbildung 46: Spannungs-Verformungs-Verhalten eines Elastomers in Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit (Dalrymple & Choi, 2007)

Hinsichtlich der Verformungsgeschwindigkeitsabhängigkeit des σ - ϵ -Verhaltens von Schäumen konnten nachfolgende Literaturstellen ermittelt werden:

Ouellet et al. (2006) untersuchten diese Abhängigkeit einem geschlossenzellige EPS-Schaum (Abbildung 47). Hierbei zeigte sich zum einen eine Zunahme des E-Moduls und der Versagensspannung mit zunehmender Verformungsrate und zum anderen eine Abnahme der Verformung, bei der die Verdichtung des Materials einsetzte. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Steigung der σ - ϵ -Kurve im Versagensbereich mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit zunahm. Das beschriebene Verhalten spiegelte sich ebenfalls in den Untersuchungen von Zhang et al. (Zhang et al., 1998) für einen PUR-Weichschaum (Dichte von $0,007 \text{ g/cm}^3$) wider.

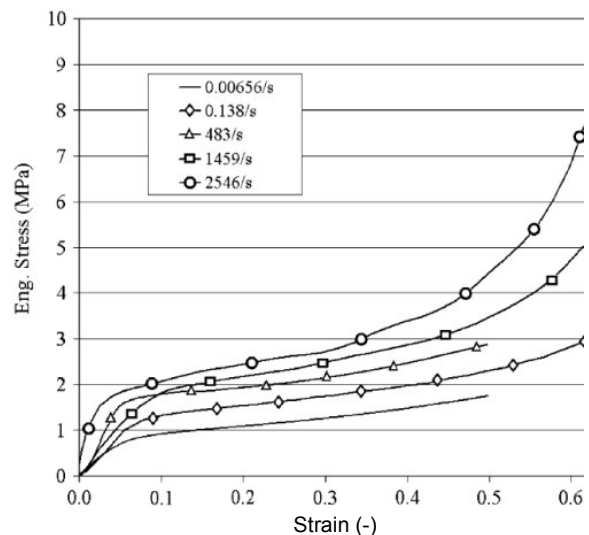


Abbildung 47: σ - ϵ -Kurven eines EPS-Schaums ($\rho = 0,112 \text{ g/cm}^3$) in Abhängigkeit von der Verformungsrate (Ouellet et al., 2006)

Eine Zunahme der Versagensspannung mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit ermittelten ebenfalls Wismans et al. (2011) für offenzellige PUR-Schäume unterschiedlicher Dichte, wie dies Abbildung 48 zeigt.

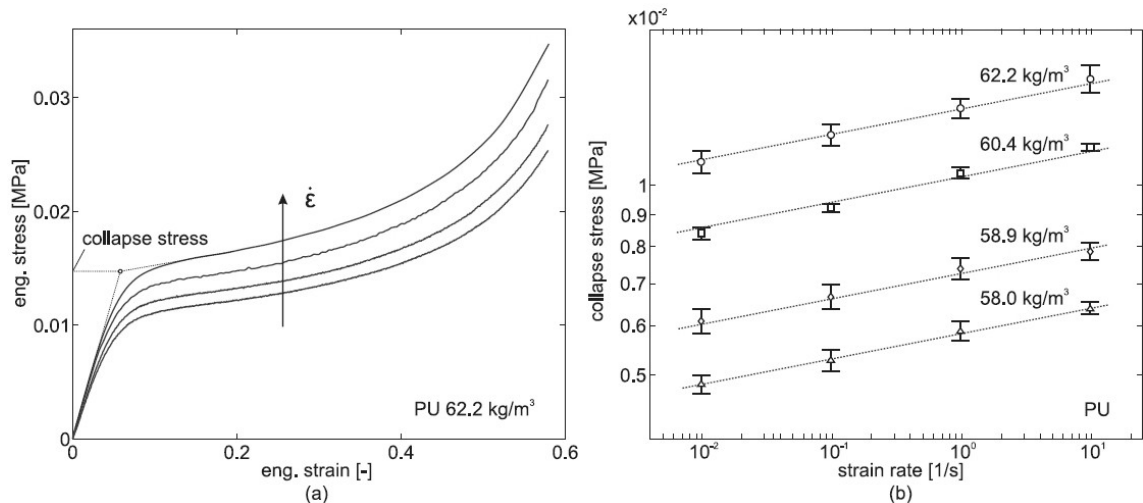


Abbildung 48: a) σ - ϵ -Kurven in Abhängigkeit von der Verformungsrate; b) Verformungsratenabhängigkeit der Versagensspannung von PUR-Schäumen unterschiedlicher Dichte (Wismans et al., 2011)

Abbildung 49 zeigt die σ - ϵ -Kurven eines EVA-Schaums mit einer Dichte von 0,1 g/cm³ in Abhängigkeit von der Verformungsrate. Die Autoren erklärten, dass die Spannungswerte im dynamischen Belastungsfall höher lagen als im quasi-statischen, da bei quasi-statischer Belastung die Schaumstruktur leichter ausknickte (Song & Shisheng, 2003). Für den untersuchten EVA-Schaum zeigte sich insbesondere bei niedrigeren Verformungsraten das bereits erläuterte Verhalten der Zunahme von E-Modul, Versagensspannung und der Steigung der σ - ϵ -Kurven im Versagensbereich mit zunehmender Verformung. Vergleichbare Resultate wurden auch bei Shariatmadari (2009) für EVA-Schäume niedriger und mittlerer Dichte feststellen.

Für die hohen Verformungsraten (ab 1100 1/s) bei Song und Shisheng (2003) lässt sich der E-Modul nicht eindeutig ermitteln. Der Verlauf der σ - ϵ -Kurven im linear-elastischen Bereich ist bei diesen Verformungsraten nahezu identisch. Dies könnte in der Ungenauigkeit des Messaufnehmers bei diesen hohen Verformungsraten begründet sein.

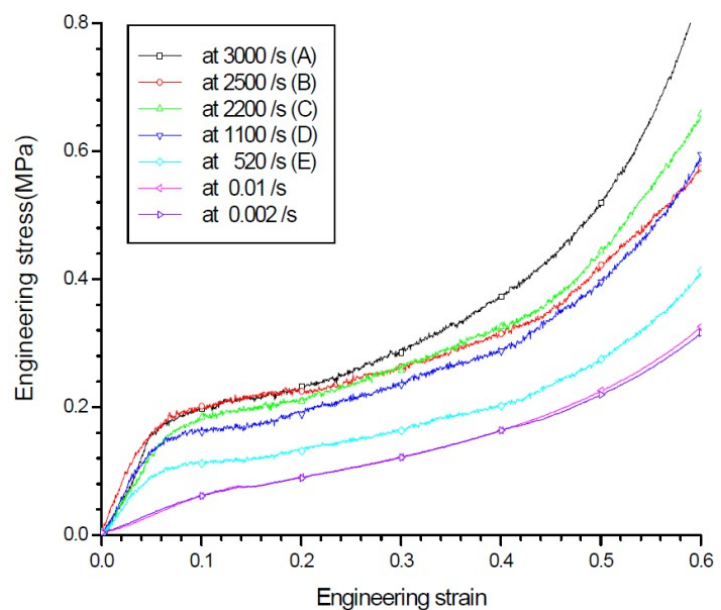


Abbildung 49: σ - ϵ -Kurven eines EVA-Schaums bei unterschiedlicher Verformungsgeschwindigkeit (Song & Shisheng, 2003)

2.6.2.3 Matrixphase: Zusammenfassung und Diskussion

Elastomere bilden die Matrixphase von weichelastischen Schaumstoffen. Aus dem Stand der Technik wird deutlich, dass sich das mechanische Verformungsverhalten von Elastomeren analog zu dem von Schäumen in die drei charakteristischen Bereiche - linear-elastischer Bereich, Spannungsabfall und erneuter starker Spannungsanstieg - unterteilen lässt.

Anhand der Literatur wird erwartet, dass unterschiedliche chemische Zusammensetzungen des Elastomers und damit der Matrixphase eine Veränderung des σ - ϵ -Verhaltens des Schaums bewirken. Der chemische Aufbau der Matrix kann qualitativ über die IR-Spektroskopie bestimmt werden. Ähnlich verhält es sich mit der Morphologie der Matrix: Eine unterschiedliche Morphologie der Matrixphase spiegelt sich in einer Veränderung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens des Schaums wider. Die Morphologie eines Elastomers kann mittels des Verlustfaktors d der Dynamisch Mechanischen Analyse (DMA) untersucht werden.

In der Literatur konnte eine eindeutige Abhängigkeit des mechanischen Verformungsverhaltens eines Elastomers (Matrixphasenmaterial) von der Verformungsgeschwindigkeit festgestellt werden, die sich in einem Anstieg von E-Modul und Versagensspannung und einer Abnahme der Verdichtungsverformung widerspiegelte. Auch für den σ - ϵ -Verlauf von Schäumen ließen sich die genannten Abhängigkeiten von der Verformungsgeschwindigkeit ermitteln. Zudem zeigte sich eine zunehmende Steigung des Kurvenverlaufs im Versagensbereich mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit.

3 Präzisierung der Aufgabenstellung

3.1 Motivation

In Deutschland ist das Laufen die drittbeliebteste Sportart (Veltins-Sportstudie, 2001) und unter deutschen Managern ist das Laufen der mit Abstand beliebteste Sport, um sich von der Arbeit zu entspannen (Müller, 2008). Der Laufschuh ist hierfür das wichtigste Sportgerät. Dies spiegelt sich auch im Umsatz der weltweiten Sportausrüster wider, die jährlich 29 Milliarden Dollar mit Schuhen umsetzen, was rund einem Drittel ihres Jahresumsatzes entspricht (Franke & Röhl, 2008). Dies verdeutlicht den Stellenwert des Laufschuhs innerhalb der Sportartikelbranche, sodass der Fokus dieser Arbeit in der Charakterisierung des mechanischen Verformungsverhaltens des Laufschuh-Zwischensohlenmaterials liegt.

Dieses Zwischensohlenmaterial besteht aus weichelastischen Schaumstoffen - insbesondere EVA-Schaumstoffen, deren Eigenschaften zum jetzigen Zeitpunkt von Materialzulieferern grundsätzlich über die Härte und Dichte spezifiziert werden. Auch wenn sich im Rahmen einer vorangegangenen Arbeit (Brückner, 01.2009) für die untersuchten EVA-Schäume ein direkter Zusammenhang dieser beiden Parameter zeigte, ist damit allerdings das mechanische Verformungsverhalten des Sportgerätes bzw. Materials auf eine dynamische Aktion des Sportlers wie beispielsweise einen Stoß oder einen Schlag unzureichend beschrieben.

Aus dem Stand der Technik wird deutlich, dass es nur wenig Literatur über EVA-Weichschäume an sich und Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens dieser EVA-Weichschäume gibt. Insbesondere wurde nur in einer Literaturstelle ein Modell zur Beschreibung des Druckverhaltens eines geschlossenzelligen EVA-Schaums dargestellt, das ein für die Autoren zufriedenstellendes Ergebnis aufzeigte (Tordon & Randall, 1993). Dieser EVA-Schaum wies eine Dichte von $0,035 \text{ g/cm}^3$ auf und lag damit deutlich unter dem typischen Wert von Laufschuhzwischensohlenmaterialien ($0,10$ bis $0,35 \text{ g/cm}^3$) (Dubois et al. 2002; Heidenfelder & Odenwald 2005; Mills & Rodriguez-Perez 2001).

Des Weiteren konnten im Stand der Technik eine Reihe unterschiedlicher Parameter eruiert werden, die das mechanische Verformungsverhalten von Weichschäumen beeinflussen. Das ausgewählte Modell beinhaltet von diesen allerdings nur die Spannung des Polymergerüsts und die relative Dichte (Atmosphärendruck konstant). Daher lässt sich schlussfolgern, dass es an einem Modell mangelt, das die erläuterten Einflussfaktoren berücksichtigt. Zu diesen Einflussfaktoren zählen sowohl die Schaumhärte, der Zelldurchmesser bzw. die zelluläre Struktur, die Prüfgeschwindigkeit als auch der chemische Aufbau und die Morphologie der Matrixphase.

3.2 Ziel der Arbeit

Aus diesen beschriebenen Defiziten leitet sich das Ziel dieser Arbeit ab: Der Forschungsbedarf besteht darin, ein physikalisches Modell für einen weichelastischen EVA-Schaumstoff zu entwickeln, das das mechanische Verformungsverhalten (σ - ϵ -Kurve) bei der Interaktion zwischen Sportler und Sportgerät am Beispiel eines Laufschuhs *anwendungsgerecht* - d.h. bei hoher Verformung und Belastungsgeschwindigkeit – kennzeichnet. Das Modell soll dabei die im Stand der Technik eruierten Einflussfaktoren berücksichtigen.

4 Methodik

4.1 Ermittlung der σ - ϵ -Daten der Schaummaterialien

Das experimentelle σ - ϵ -Verhalten der vorliegenden Schaummaterialien wird mittels anwendungsspezifischer Prüfung ermittelt, die sich aus der mechanischen Prüfung von Laufschuhen ableitet. Diese erfolgt mittels einer servohydraulischen Druckprüfmaschine, wobei ein ballig geformter Stempel im Winkel von 90° gegen die feste Standfläche des zu prüfenden Schuhs ausgerichtet ist. Das Lastkollektiv wird von Messungen der beim Laufen auftretenden Bodenreaktionskraft abgeleitet. Die Analyse der resultierenden Bodenreaktionskraft-Kurve zeigt, dass der Rückfußbereich eines Läufers, der bei einer Laufgeschwindigkeit von $3,5 \pm 0,1$ m/s auf den Untergrund auftrifft, innerhalb von 35 ms mit rund dem zweifachen Körpergewicht (1500 N) belastet wird (Kleindienst, 2003; Heidenfelder, 2004). Entsprechend dieser Ergebnisse wird in der Prüfmaschine ein Kraft-Zeit-Verlauf abgebildet, der diese beim Bodenkontakt des Rückfußes auftretende Belastung in z-Richtung für einen durchschnittlichen Läufer widerspiegelt.

Die Analyse der Kraft-Verformungs-Werte für diese anwendungsspezifische Prüfung zeigt für 42 Laufschuhe unterschiedlicher Hersteller folgendes Ergebnis: Bei einer durchschnittlichen Sohlendicke von 27,5 mm tritt durchschnittlich eine maximale Verformung von 12,4 mm bzw. 45 % auf. Daraus resultiert eine durchschnittliche Verformungsgeschwindigkeit von 350 mm/s. Vergleichbare Werte wurden ebenso in den Ergebnissen von Heidenfelder (2004) erzielt.

Aus diesen Erkenntnissen leitet sich die anwendungsgerechte, sportspezifische Prüfung ab, anhand der die Spannungs-Verformungs-Kurven der vorliegenden Plattenmaterialien ermittelt werden. Zunächst wird anstatt des für die Prüfung von Laufschuhen üblichem, balligem Stempels ein - entsprechend des Profils der Plattenmaterialien - flacher Stempel mit einem Durchmesser von 50 mm verwendet. Die Durchmesser der beiden Stempel sind damit identisch. Die Prüfung der plattenförmigen Versuchsmaterialien erfolgt weggesteuert in der servohydraulischen Prüfmaschine HC10, Zwick GmbH & Co. KG in Ulm, mit der beschriebenen Verformungsgeschwindigkeit von 350 mm/s bis zu einer Verformung von mindestens 45 %. Die Platten werden zur Fixierung jeweils um 2 mm in der Prüfmaschine vordeformiert. Es werden jeweils drei Prüfkörper mit einem Durchmesser von 50 mm mittels Wasserstrahlschneiden aus den Plattenmaterialien gefertigt. Die Richtung der Verformung erfolgt entsprechend der Belastung im Laufschuh orthogonal zur Plattenoberseite. Auf Grund eines initialen Setzverhaltens wird der 100. Zyklus zur Datenauswertung herangezogen.

4.2 Versuchsmaterialien

Bei den Versuchsmaterialien handelt es sich um plattenförmige Schäume aus EVA-Zwischensohlenmaterial, die laut Hersteller in vier unterschiedlichen Härten hergestellt wurden. Zusätzlich zu diesen geschäumten Materialien stand ein massives EVA-Elastomer als Polymerphase der Schäume zur Verfügung. Abbildung 50 zeigt den typischen Aufbau einer Laufschuhsohle mit dem entsprechenden EVA-Zwischensohlenmaterial. Zwischensohlen aus EVA werden vorzugsweise mittels Kompressionspress-Verfahren gefertigt. Die Herstellung erfolgt in einem zweistufigen Prozess. Hierbei wird zuerst ein Rohling aus einem ungeschäumten und unvernetzten Granulat bestehend aus EVA-Polymer, Treibmittel und einem Vernetzungssystem in der auf rund 100 °C vorgewärmten Werkzeugform auf der Presse hergestellt (Abbildung 51). Der vorgeformte Rohling wird nach einem Tempervorgang im Ofen, der gleichmäßige Durchvulkanisation und verkürzte Ausheizzeiten garantiert, erneut zwischen die beiden Formhälften des Werkzeugs gelegt. Unter hoher Temperatur werden diese erneut zusammen gepresst, wobei durch den Abbau des Treibmittels der Schaum gebildet wird und durch die Volumenausdehnung die Mischung den gesamten Hohlraum ausfüllt. Zur Vermeidung von Lufteinschlüssen wird die Presse durch Zu- und Auffahren während der Vulkanisation entlüftet. Das Werkzeug wird solange beheizt, bis das Formteil ausvulkanisiert ist (Jenkins, 2003).



Abbildung 50: EVA-Zwischensohlenmaterial in Puma Complete Running Schuh (Bildnachweis: Puma AG, Herzogenaurach)



Abbildung 51: Werkzeug mit vorgeformten Rohling (Bildnachweis: Puma AG, Herzogenaurach)

4.3 Ableitung eines Modells auf Basis der Einflüsse aus dem Stand der Technik

Die Grundlage zur Beschreibung des mechanischen Verformungsverhaltens von EVA-Schäumen unter sportspezifischer Belastung bildet das Modell von Gibson und Ashby (2001) entsprechend Gleichung 8.

$$\sigma_s(\epsilon) = \sigma_p(\epsilon) + \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - R} \quad (8)$$

Aus dem Stand der Technik lassen sich diverse Einflussfaktoren auf Matrix- und Gasphase ableiten. Die einzelnen Abhängigkeiten gilt es zunächst für die vorliegenden Materialien mit geeigneten Methoden zu bestimmen und gegebenenfalls mathematisch zu formulieren, um diese anschließend in das Modell zu integrieren. Zusammenhänge für die vorliegenden Materialien werden anhand des Korrelationskoeffizienten R untersucht, wobei ein $0,8 \leq R \leq 0,95$ einen starken und ein $R \geq 0,95$ einen sehr starken Zusammenhang kennzeichnet. Die Voraussetzungen für die Verwendung des Modells wie Geschlossenzelligkeit, inkompressible Polymerphase und eine Poissonzahl von Null sind ebenfalls zu überprüfen. Abschließend wird die Qualität des entwickelten Modells anhand des Vergleichs mit den experimentell gemessenen σ - ϵ -Daten der Schaummaterialien ermittelt.

4.4 Methoden zur Bestimmung der Einflussparameter

4.4.1 Parameterbestimmung der Gasphase

4.4.1.1 Analyse der Dichte

Um die Schaumdichte der vorhandenen Schaummaterialien zu ermitteln, werden die unterschiedlichen Platten jeweils dreimal gewogen und deren Abmaße bestimmt, wobei alle Platten die gleiche Grundfläche von $120 \times 120 \text{ mm}^2$ aufzeigen, sodass gilt (Gleichung 17):

$$\rho_s = \frac{m_s}{1440 \text{ mm}^2 * d} \quad (17)$$

mit m : Masse des jeweiligen Plattenmaterials

d : Dicke des Plattenmaterials

Im erarbeiteten Modell wird ebenso die Dichte der Polymerphase einberechnet. Es wird darauf hingewiesen, dass nur eine massive EVA-Platte vorhanden ist, sodass nur ein Wert für die Dichte der Polymerphase ermittelt werden kann. Die Überprüfung, ob dieses EVA-Material die Polymerphase der vorliegenden Schaummaterialien bildet, erfolgt anhand des chemischen Aufbaus und der Morphologie in Kapitel 4.4.2.1.

4.4.1.2 Analyse der Schaumhärte

Wie bereits erläutert wird der Parameter Schaumhärte weithin zur Beurteilung von Weichschäumen bzw. deren Stoßdämpfungsverhaltens eingesetzt, sodass dieser Parameter von besonderem Interesse ist. Des Weiteren wird ein Zusammenhang von zunehmender Härte mit ansteigender Schaumdichte erwartet, sodass der Parameter Schaumdichte durch den Parameter Härte im Modell ersetzen werden könnte, wenn sich dieser Zusammenhang bestätigt.

Die Härte wird mit einem Durometer an fünf Stellen auf der Oberseite jedes Plattenmaterials - wie in Kapitel 2.6.1.2 erläutert – gemessen. Für die vorliegenden Materialien werden Werte zwischen 40 und 70 Asker C erwartet, wobei eine Härte von 40 Asker C als weich und eine Härte von 70 Asker C als hart bewertet wird (Verdejo & Mills 2002).

4.4.1.3 Analysen der zellulären Struktur

Matrixverteilung, Zelldurchmesser und Zellanzahl

Es wurde erläutert, dass insbesondere der Zelldurchmesser einen Einflussfaktor auf das mechanische Verformungsverhalten eines Schaums bildet. Die gefundenen Literaturstellen untersuchten dabei diesen Parameter bei konstanter Schaumdichte. Zeigt sich bei unterschiedlichen Schäumen eine unterschiedliche Schaumdichte, so ist auf Grund des Herstellungsverfahrens davon auszugehen, dass bei einem Schaum höherer Dichte mehr Matrixmaterial in die Werkzeugform gefüllt wird als bei einem weniger dichten. Dies spiegelt sich ebenfalls in der Härte des Schaums wider. Dieser Zusammenhang von Härte und Dichte bestätigte sich in einer vorhergehenden Studie an EVA-Schaummaterialien (Brückner, 01.2009; Brückner & Odenwald, 2009). Es ist dabei allerdings nicht klar, wie sich eine Veränderung dieser Parameter auf die zelluläre Struktur auswirkt, da die Härte grundsätzlich an der Oberfläche des Materials gemessen wird, indem ein kugelförmige Eindringkörper maximal 2,5 mm tief in den Schaum gepresst wird.

Klempner und Aseeva (2004) erklärten, dass die gemessene Dichte nur ein Mittelwert ist, da die Dichte der Oberflächenschichten einen bis zu 10-mal höheren Wert als den Mittelwert aufweisen kann. Demzufolge könnte sich eine zunehmende Dichte des Schaums in einer Massenanhäufung des Matrixmaterials an den Schaumaußenseiten („Integralschaum-Charakter“) begründen, was demzufolge eine Zunahme der Härte bewirkt.

Schematisch wird dies in Abbildung 52 dargestellt. Um dies zu untersuchen, wird die maximale Kraft zur Verformung des Schaums um 45 % analysiert, um nicht nur die Oberflächeneigenschaften, sondern auch die Eigenschaften im Schauminnern zu bestimmen. Vergleichbar ist diese Prüfung mit dem normierten Eindruckverfahren zur Bestimmung der Härte weichelastischer polymerer Schaumstoffe

nach DIN EN ISO 2439. Bei diesem Verfahren wird die Kraft gemessen, die erforderlich ist, um einen Probekörper um 40 % der Ausgangsdicke zusammenzudrücken.

Eine weitere Möglichkeit, wie sich die zelluläre Struktur mit zunehmender Dichte ändert, könnte derart sein, dass bei konstanter oder abnehmender Zellanzahl der Zelldurchmesser abnimmt (Kleindienst 2003; Miyoshi et al. 1999) und die Zellwanddicke zunimmt (Bouix et al. 2009; Klempner & Aseeva 2004; Miyoshi et al. 1999; Rodríguez-Pérez & De Saja (2000); Viot et al.; 2005). Schematisch dargestellt wird dies in Abbildung 53.

Ebenso besteht die Möglichkeit bei zunehmender Dichte, dass bei zunehmender Zellanzahl und folglich auch zunehmender Zellwandanzahl der Zelldurchmesser abnimmt und die Zellwanddicke konstant bleibt oder ebenfalls abnimmt (Abbildung 54) (Viot et al.; 2005).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es unterschiedliche Ansätze gibt, wie sich auf Grund einer Dichtezunahme die zelluläre Struktur verändert. Dabei ist das am meisten verwendete Beurteilungsmerkmal von polymeren Schaumstrukturen der Zelldurchmessers (Klempner & Aseeva, 2004).

In einer ersten Analyse der zellulären Struktur wird untersucht, ob bei den vorliegenden Schäumen eine zunehmende Dichte eine Massenanhäufung an den Probekörperaußenseiten („Integralschaum“) verursacht, was sich in einer höheren Oberflächenhärte im Vergleich zur Härte im Schaumkern widerspiegelt. Daraus ergibt sich eine unterschiedliche Zellgrößenverteilung in Außenfläche und Schaumkern. Die Schäume werden für diese Analyse jeweils um 45 % deformiert und die maximale Kraft ermittelt, die hierzu aufgewendet werden muss.

In einer zweiten Untersuchung werden lichtmikroskopische Aufnahmen mit 20-facher Vergrößerung von jedem Schaummaterial erstellt. Da eine Pore dunkel und die Zellwand hell erscheint, wird zunächst der Weißanteil der Aufnahmen bestimmt, um grundsätzliche Unterschiede zwischen den Schäumen zu untersuchen. Anschließend werden die Zelldurchmes-

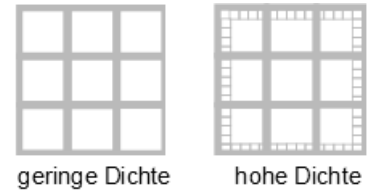


Abbildung 52: Schema:
Veränderung an den
Schaumaußenseiten

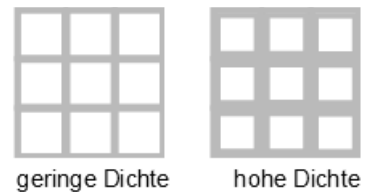


Abbildung 53: Schema:
Veränderung Zelldurchmesser und
Zellwanddicke

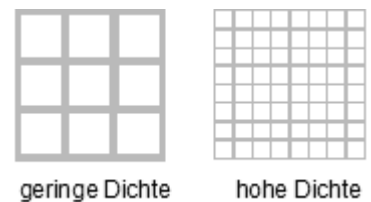


Abbildung 54: Schema:
Veränderung Zellanzahl

ser der vorliegenden Schäume mittels PORE!SCAN-Verfahren - wie in Kapitel 2.6.1.3 erläutert - analysiert. Hierzu werden rund 400 Zellen pro Aufnahme an jeweils fünf Probekörperstellen untersucht. Rund 2000 ausgewertete Zellen pro Schaum sollte - auch im Vergleich zu Untersuchungen anderer Autoren (400 bis 1000 Zellen) (Bureau & Gendron, 2003; Rodríguez-Pérez & De Saja, 2000; Lewis et al., 1996; Rodríguez-Pérez et al., 1998) - eine ausreichende Anzahl darstellen, um eine repräsentative Aussage über die zelluläre Struktur eines Schaums zu erhalten. Zur Probenpräparation werden die Schaumplatten zunächst für rund 5 s in Flüssigstickstoff getaucht und unmittelbar danach mit einem Cutter im Querschnitt abgeschnitten, um eine möglichst unbeschädigte Schnittfläche zu erhalten (Zhang et al., 2007). Der Kontrast zwischen Zellsteg und Pore wird durch die Einfärbung der Oberfläche mittels Rußspray erhöht.

In einer dritten Untersuchung werden REM-Aufnahmen mit einer 50-fachen Vergrößerung der vorhandenen Schäume mittels eines Rasterelektronenmikroskops (LEO 1455VP, Carl Zeiss AG) erstellt (Abbildung 55). Die vertikale Bildrichtung entspricht der Belastungsrichtung. Die Probekörper werden mit Kohlenstoff behandelt, um die Leitfähigkeit zu gewährleisten, und anschließend mit Gold bedampft, um die Ausbeute der Sekundärelektronen und damit den Kontrast zu erhöhen. Es werden an drei Stellen pro Schaum REM-Aufnahmen erstellt. Anhand dieser REM-Aufnahmen werden die Größenverteilungen der Zelldurchmesser bestimmt. Hierzu werden durch jede REM-Aufnahme zehn horizontale Linien (entsprechend Martínez-Díez et al., 2001) gezogen und vor bzw. nach jeder Zellwand Punkt-Markierungen gesetzt (Abbildung 86). Die Zellen werden dabei zufällig von diesen Linien geschnitten. Über den vorhandenen Maßstab werden die in Pixel ermittelten x-Koordinaten der Markierungen in μm umgerechnet und die Sehnenlängen der Zellen bestimmt (Sims & Khunniteekool, 1994). Die ermittelten Sehnenlängen werden entsprechend ASTM D 3576-04 über den Näherungsfaktor 1,623 in den mittleren Zelldurchmesser umgerechnet.

In einer vierten Untersuchung wird ein Schaum mittels 3-D-Mikro-Computertomographie analysiert und die Zelldurchmesserverteilung bestimmt. Dieses Verfahren wird mit den beiden vorangegangenen Messverfahren, bei denen 2-D-Schnittbilder der dreidimensionalen Zellen erstellt werden, verglichen. Da es sich um ein sehr teures Verfahren handelt, wird nur ein Schaum im Rahmen einer Voruntersuchung analysiert.

Um die Problematik des Vermessens der einzelnen Zellen zu umgehen, wird in einer weiteren Untersuchung die zelluläre Struktur anhand der Zellanzahl in den REM-Aufnahmen charakterisiert. Hierzu wird jede erkennbare Zelle mit einem grünen Punkt markiert (Abbildung 56), der sich eindeutig von der schwarz-weißen REM-Aufnahme unterscheiden lässt. Anschließend wird dieses Punktbild in ein Graustufenbild umgewandelt und der Weißanteil anhand des Histogramms bestimmt (Abbildung 57). Der Weißanteil charakterisiert demzufolge

ge die Zellanzahl des Schaums: Je höher der Weißanteil, desto geringer ist die Zellanzahl.

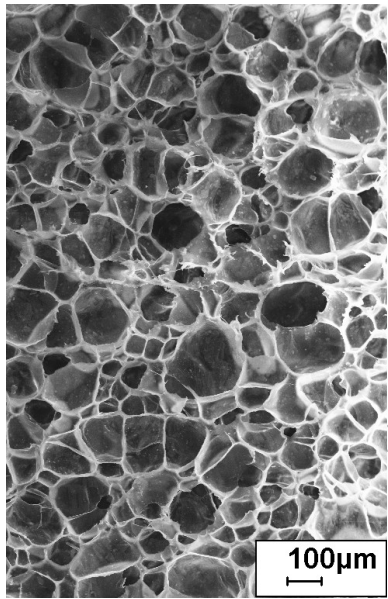


Abbildung 55: Ursprüngliche REM-Aufnahme

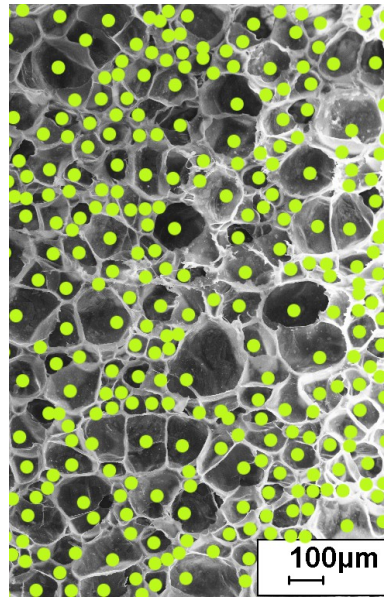


Abbildung 56: REM-Aufnahme mit entsprechenden Punkten pro Zelle

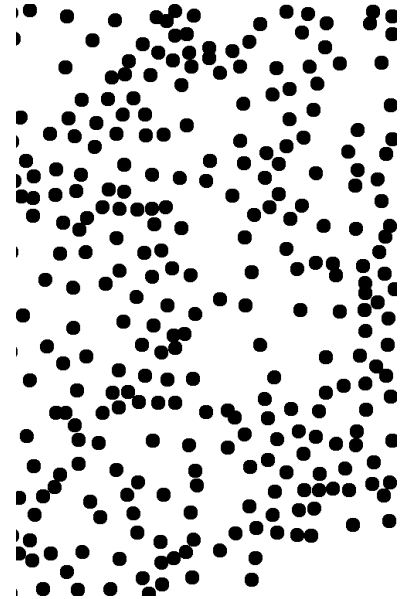


Abbildung 57: Bestimmung des Weißanteils

Zelligkeit und Querausdehnung

Aus dem Stand der Technik wurde zum einen deutlich, dass die Zelligkeit und die Querausdehnung einen Einfluss auf das σ - ϵ -Verhalten von Schäumen haben kann. Zum anderen sind Geschlossenzelligkeit und keine Querausdehnung des Schaums Voraussetzungen für die Verwendung des Modells von Gibson und Ashby bzw. der Luftfeder-Berechnung als Gasanteil. Diese Bedingungen werden wie folgt geprüft:

Die Zelligkeit wird unter dynamischer Belastung in der servohydraulischen Prüfmaschine Zwick HC10 untersucht, während die Schäume in Wasser lagern. Entweicht das in den Zellen vorhandene Gas in Form von Luftbläschen während der Verformung, weist dies auf einen offenzelligen Schaum hin, wohingegen bei einem geschlossenzelligen Schaum die Luft in den Zellen eingeschlossen bleibt bzw. nicht entweicht.

In einem weiteren Test wird die Zelligkeit dahingehend analysiert, ob sich bei einer dynamischen Belastung unter Wasser, die Masse des Schaums verändert. Eine Massenänderung des Schaums deutet darauf hin, dass Wasser ins Material gesaugt wird, was auf einen offenzelligen Schaum hinweist. Es wird vernachlässigt, dass das Matrixmaterial hydrophil sein könnte bzw. an sich Wasser aufsaugen könnte, da es sich um Kurzzeittests handelt. Als Vergleichsmaterial wird ein - laut Hersteller - offenzelliger PUR-Schaum verwendet. Für diesen Versuch werden Probekörper mit einem Durchmesser von 50 mm in der servohydraulischen Prüfmaschine Zwick HC10 über 3000 Zyklen mechanisch unter Wasser getestet, was rund einem halbstündigen Lauf entspricht. In definierten Abständen wird dabei die Masse

des Probekörpers mittels Feinwaage bestimmt.

Um die Querausdehnung der Schäume zu analysieren, wird zunächst eine optische 2-D-Verformungsanalyse (ARAMIS System, GOM mbH) bei einer Verformungsgeschwindigkeit von 2,5 mm/s (quasi-statisch) durchgeführt. Hierbei wird die Oberfläche des Probekörpers von zwei Digitalkameras erfasst, in kleine Facetten eines Koordinatensystems aufgeteilt und die Verschiebungen der Facetten werden während der Verformung des Objekts erfasst (Kockelmann, 2011). Der Probekörper wird mit einem stochastischen Schwarz-Weiß-Muster besprüht, um die Verschiebung der Facetten mittels Grauwertkorrelation (VEDDAC 5.0, Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH) auszuwerten.

In einem zweiten Versuch wird das Verformungsverhalten des Schaummaterials mittels 3-D-Mikro-Computertomographie analysiert. Hierbei wird eine Einweg-Kunststoffspritze, die mit einer Verschraubung versehen ist, verwendet, um den Schaum definiert zu deformieren und gleichzeitig in der μ -CT-Anlage (nanotom, GE measurement & control) computertomographisch zu untersuchen (Abbildung 58). Der Probekörperdurchmesser ist geringer als der Innendurchmesser der Einwegspritze, sodass sich der Probekörper quer zur Belastungsrichtung ausdehnen kann.

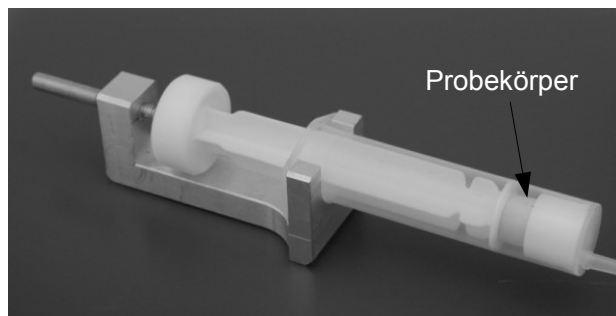


Abbildung 58: „Verformungsapparatur“ zur μ -CT-Analyse

Im dritten Versuch wird das Verformungsverhalten des Schaums während dynamischer Belastung in der servohydraulischen Prüfmaschine Zwick HC10 mittels Highspeed-Kamera aufgezeichnet. Bei dieser Untersuchung wird die Verformung des Schaums bei der real auftretenden Belastungsgeschwindigkeit von 350 mm/s analysiert.

Unter diesen beiden Bedingungen kann Gleichung 8 als Berechnung für das Spannungsverhalten der in den Zellen eingeschlossenen Luft verwendet werden. Denn bei Geschlossenzelligkeit bleibt die im Schaum vorhandene Luft innerhalb des Schaumgerüsts gefangen und wird nicht aus den Zellen gedrückt, sobald der Probekörper deformiert wird. Diese im Schaum eingeschlossene Luft wird entweder komprimiert oder elastisch deformiert, was anhand der Poissonzahl ermittelt wird. Bei Geschlossenzelligkeit und keiner Querausdehnung des Schaums (Poissonzahl von Null) ist die Luft volumen-kompressibel, sodass Gleichung 8 für σ_G im Modell eingesetzt werden kann.

Verformungsmechanismen im Schaum

Die mikroskopische Analyse der zellulären Schaumstruktur bei gleichzeitiger Verformung soll Aufschluss geben, ob es Verformungsmechanismen innerhalb der zellulären Schaumstruktur gibt und wenn ja, ob sich diese in dem charakteristischen Verlauf der Spannungs-Verformungs-Kurve mit linear-elastischem Bereich, Versagensbereich und Verdichtungsbereich widerspiegeln. Lassen sich unterschiedliche Deformationsmechanismen feststellen, bedeutet dies für das Modell, dass für jeden Verformungsbereich ein anderes Modell erstellt werden muss bzw. dass das vorliegende Modell nur für einen bestimmten Bereich gilt.

Hierzu wird das Schaummaterial in einem Mikro-Zug-/Druckmodul der Fa. Kammrath und Weiss GmbH bei einer quasi-statischen Geschwindigkeit von 20 $\mu\text{m/s}$ verformt und die Kraft-Weg-Daten aufgezeichnet. Parallel dazu werden lichtmikroskopische Aufnahmen des Schaummaterials erstellt. Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt mittels Grauwertkorrelations-Software (VEDDAC 5.0, Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH).

4.4.2 Parameterbestimmung der Matrixphase

Das Spannungs-Verformungs-Verhalten des Matrixmaterials (EVA-Elastomer) wird analog zum Schaummaterial weggesteuert mittels servohydraulischer Druckprüfmaschine ermittelt (Dalrymple & Choi, 2007). Da die Last der Maschine zu gering ist, um einen massiven Probekörper mit einem Durchmesser von 50 mm zu verformen, werden Probekörper mit einem Durchmesser von 10 mm hergestellt und geprüft. Um die Daten mit denen des Schaums in Relation setzen zu können, wird die ermittelte Kraft mit Hilfe des Probekörperdurchmessers in Spannung umgerechnet. Diese Spannungs-Verformungs-Daten bilden den Anteil der Matrix im Modell.

4.4.2.1 Analyse des chemischen Aufbaus und der Morphologie der Matrix

Ausgehend von der Tatsache, dass nur ein massives Matrixmaterial zum Prüfen vorliegt, können Einflüsse unterschiedlicher Matrixmaterialien auf das mechanische Verformungsverhalten des Schaums nicht untersucht werden.

In Kapitel 4.4.1.3 wurde erläutert, dass auf Grund des Herstellungsverfahrens davon auszugehen ist, dass bei einem härteren Schaum mehr Material in die Werkzeugform gefüllt wird und somit mit zunehmender Härte die Schaumdichte zunimmt. Dazu müssen die vorliegenden Schäume allerdings aus dem gleichen Matrixmaterial aufgebaut sein. Hierfür wird die chemische Zusammensetzung sowohl des vorhandenen, massiven EVA-Elastomers als auch der unterschiedlichen Schaummaterialien anhand einer IR-Spektroskopie bestimmt. Sind die IR-Spektren identisch, bildet das EVA-Elastomer das Matrixmaterial der unterschiedlichen Schäume. Die Analyse der Materialien erfolgt mittels FTIR-Spektrometer Nicolet

iS10 der Thermo Fisher Scientific GmbH.

In einer zweiten Untersuchung wird dies anhand der Morphologie der Matrix überprüft. Hierzu wird der Verlustfaktor (d) der Dynamisch-Mechanischen-Analyse ermittelt. Für die Untersuchung von Schäumen eignet sich laut Ehrenstein et al. (2003) der Kompressionsversuch. Dieser erfolgt mittels einer Kompressionsklemme (15 mm Plattendurchmesser) bei einer Standardmessfrequenz von 1 Hz und einer Verformungsamplitude von 100 μm in einem Q800-DMA-Analysegerät der TA Instruments Germany. Es wirkt eine Vorkraft von 0,1 N, um eine straffe Einspannung der Probekörper bzw. den Kontakt der beweglichen Klemme mit dem Probekörper zu gewährleisten. Die zylindrischen Probekörper sollen eine Höhe von 10 mm und entsprechend den Klemmen-Abmessungen einen Probendurchmesser von 15 mm aufweisen.

Für das Modell bedeuten ein identischer chemischer Aufbau und eine identische Morphologie von EVA-Elastomer und Schaummaterialien, dass der in Kapitel 4.4.2 ermittelte Spannungs-Verformungs-Verlauf des EVA-Elastomers als Matrixanteil im Modell eingesetzt werden kann.

4.4.2.2 Untersuchung der Verformungsgeschwindigkeitseinflusses

Wie im Stand der Technik umfassend erklärt, wird eine Abhängigkeit des Spannungs-Verformungs-Verhaltens sowohl der elastomeren Matrix als auch der Schäume von der Verformungsgeschwindigkeit erwartet. Des Weiteren erläuterten Gibson und Ashby (2001), dass der Anteil des in den Zellen eingeschlossenen Gases verformungsraten-unabhängig ist, sodass sich die Abhängigkeit des Schaums von der Verformungsgeschwindigkeit in der Abhängigkeit der Matrix von der Verformungsgeschwindigkeit begründet.

Um diese Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit zu untersuchen, werden sowohl quasi-statische als auch dynamische Versuche an Matrix- und Schaummaterial durchgeführt. Quasi-statische Versuche erfolgen bei einer Verformungsgeschwindigkeit von 1 mm/s. Eine zu untersuchende Verformungsgeschwindigkeit von 350 mm/s leitet sich aus der anwendungsspezifischen Prüfung von Laufschuhen ab, was in Kapitel 4.1 ausführlich beschrieben wurde. Als maximal zu prüfende Verformungsgeschwindigkeit wird ein Wert von 1000 mm/s festgelegt. Dieser Wert ergibt sich bei einer maximalen, kinetischen Energie von 50 J für einen Athleten von durchschnittlich 75 kg, was in Kapitel 2.3 bereits erläutert wurde. Diese Verformungsgeschwindigkeit ist ebenfalls bei der genormten Prüfung von Laufschuhen vorgeschrieben (ASTM F1614-99). Die zylindrischen Probekörper mit einem Durchmesser von 50 mm werden mittels Wasserstrahlschneiden aus den jeweiligen Plattenmaterialien gefertigt und in der servohydraulischen Druckprüfmaschine bei den entsprechenden Verformungsgeschwindigkeiten geprüft.

Zeigt sich in den Versuchen eine vergleichbare Abhängigkeit von Matrix und Schaum von der Verformungsgeschwindigkeit, bestätigt dies zum einen die Verformungsraten-unabhängigkeit der in den Zellen komprimierten Luft. Zum anderen bedeutet dies für das Modell, dass bei gleicher Verformungsgeschwindigkeit der Matrixanteil konstant bleibt und sich Unterschiede im σ - ϵ -Verlauf der Schäume in einem unterschiedlichen Gasphasen-Anteil begründen.

5 Ergebnisse

5.1 σ - ϵ -Verlauf der untersuchten Schaummaterialien

Abbildung 59 zeigt die Spannungs-Verformungs-Kurven der untersuchten Schäume bei der für Laufschuhe typischen Verformungsgeschwindigkeit von 350 mm/s. Für den E-Modul lassen sich für die untersuchten Schäume nur geringe Unterschiede von maximal 0,3 MPa (15 %) ermitteln.

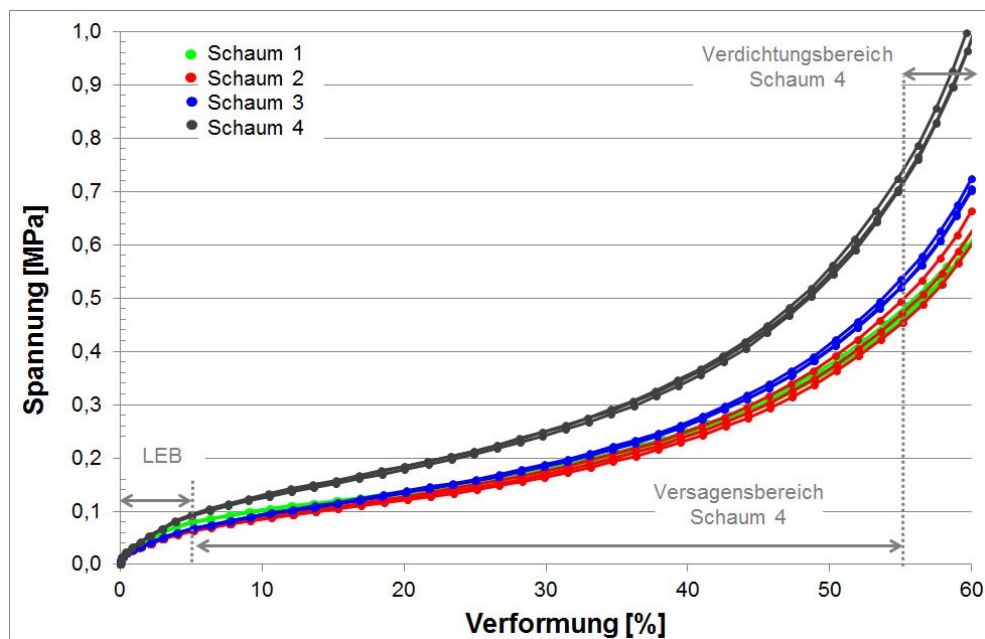


Abbildung 59: σ - ϵ -Verhalten der unterschiedlichen EVA-Schäume bei 350 mm/s Prüfgeschwindigkeit

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse von Versagensspannung σ_{el}^* und Spannung bei 5 % Verformung. Die Versagensspannung σ_{el}^* ist über den Schnittpunkt der Extrapolation der Anstiegs-kurve im linear-elastischen Bereich, dem E-Modul, und der Tangente des Versagensplateaus laut Gibson und Ashby (1982) definiert. Um diese zu bestimmen, wurden die Tangenten jeweils manuell mit einem Lineal festgelegt und die Versagensspannung fünf Mal pro σ - ϵ -Kurve ermittelt.

Die beiden Parameter unterscheiden sich um maximal 0,020 MPa. Dies wird als geringfügig beurteilt, sodass zur Vereinfachung die Versagensspannung im weiteren Verlauf bei einer Verformung von 5 % bestimmt bzw. der Beginn des Versagensbereichs bei 5 % Verformung festgesetzt wird.

Tabelle 1: Versagensspannungen der untersuchten Schaummaterialien (links: Versagensspannung nach Gibson und Ashby (1982); rechts: Versagensspannung nach Avalle et al. (2001))

	Versagensspannung	Spannung bei 5 % Verformung
	[MPa]	[MPa]
Schaum 1	0,09 ± 0,01	0,08 ± 0,00
Schaum 2	0,06 ± 0,01	0,06 ± 0,00
Schaum 3	0,07 ± 0,01	0,07 ± 0,00
Schaum 4	0,11 ± 0,01	0,09 ± 0,00

Die Steigung im Versagensbereich ist für Schaum 3 und 4 identisch. Für die beiden anderen Schäume konnte diese nicht bestimmt werden, da die Endpunkte des Versagensbereiches außerhalb des Messbereichs liegen (65 bzw. 67 % Verformung).

Anhand der Parameter Versagensspannung und E-Modul wird ersichtlich, dass insbesondere Schaum 1, 2 und 3 einen nahezu identischen σ - ϵ -Verlauf aufweisen. Dies wird anhand des Energieeintrags in Abbildung 60 verdeutlicht. Der Energieeintrag der ersten drei Schäume liegt zwischen 6,9 und 7,6 J, wohingegen Schaum 4 mit einem Energieeintrag von 10,3 J deutlich höher liegt.

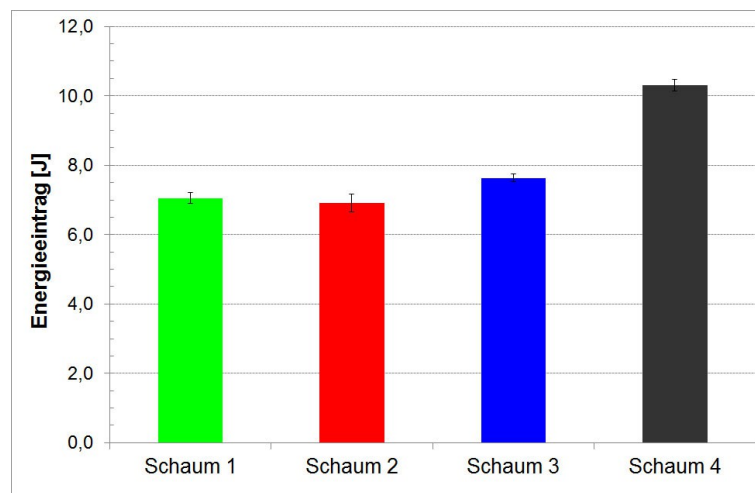


Abbildung 60: Energieeintrag [J] bei 350 mm/s Verformungsgeschwindigkeit

5.2 Einflüsse auf das mechanische Verformungsverhalten der Schaummaterialien

5.2.1 Gasphase

5.2.1.1 Unterschiedliche Schaumdichten

Abbildung 61 zeigt die Schaumdichten der untersuchten Versuchsmaterialien, wobei Schaum 4 eine deutlich höhere Dichte aufweist als die anderen drei Schäume. Die Werte liegen im für Laufschuhzwischensohlen typischen Bereich, der von 0,12 bis 0,35 g/cm³ reicht (Dubois et al. 2002; Heidenfelder & Odenwald 2005; Mills & Rodriguez-Perez 2001). Die für Schaum 2 und 3 hohen Standardabweichungen im Vergleich zu den beiden anderen Schäumen begründen sich darin, dass die Schaumplatten nicht exakt quaderförmig sind.

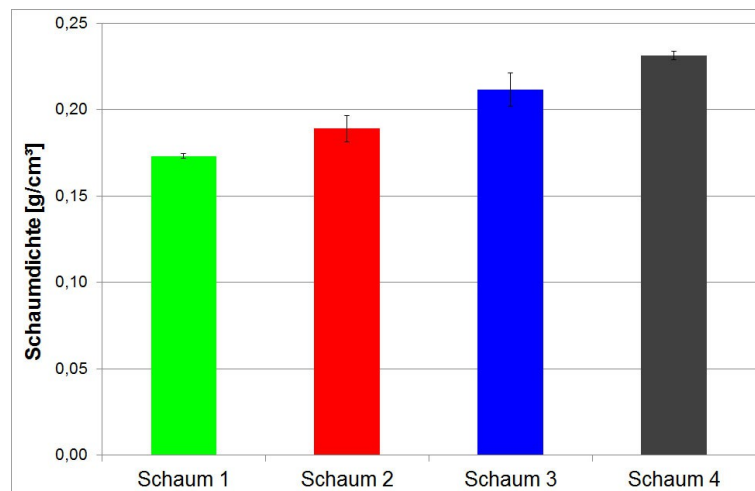


Abbildung 61: Dichten der untersuchten Schäume [g/cm³]

Für das massive EVA-Elastomer (Matrixphase) wird eine Dichte ρ_P von 0,81 g/cm³ ermittelt. Es wird darauf hingewiesen, dass von diesem Material nur eine Platte vorhanden ist, um den Dichtewert zu bestimmen. Des Weiteren ist dieses EVA-Elastomer nicht durchgehend massiv, sondern von einzelnen Luftbläschen durchsetzt, was den wahren Dichtewert geringfügig beeinflusst.

5.2.1.2 Unterschiede in der Schaumhärte

Abbildung 62 zeigt die Härte-Werte der untersuchten Schäume. In verschiedenen Studien über Laufschuhe zeigte sich, dass die Bandbreite der Härte bei Zwischensohlenmaterialien von 40 bis 70 Asker C reicht, wobei eine Härte von 40 Asker C als weich eingestuft wird und 70 Asker C dementsprechend als hart (Boyer & Nigg 2004; Dubois et al. 2002; Verdejo & Mills 2002). Die vorliegenden Schäume liegen mit Härte-Werte von 53 bis 63 Asker C demzufolge im üblichen Bereich für Zwischensohlenmaterialien. Außer zwischen Schaum 1 und Schaum 2 sind alle Härte-Unterschiede zwischen den Schäumen hoch signifikant ($p < 0,10$;

T-Test bei unabhängigen Stichproben). Die Daten sind dabei normal verteilt ($p < 0,05$).

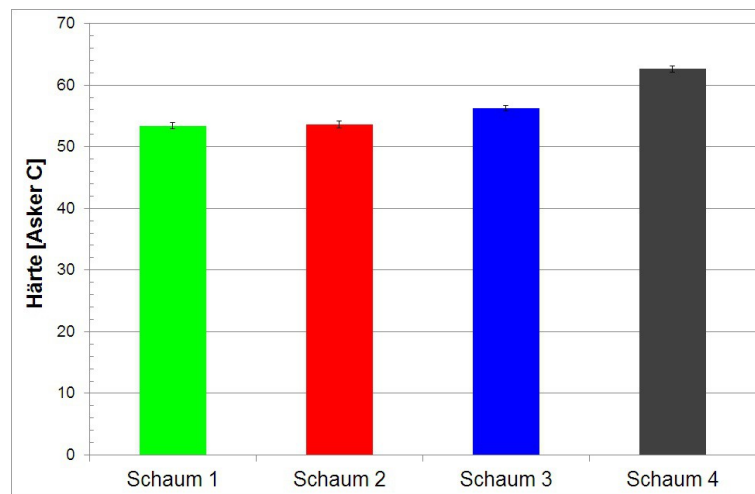


Abbildung 62: Härte der untersuchten Schäume

5.2.1.3 Zelluläre Struktur

Matrixverteilung unterschiedlich; Zelldurchmesser bzw. Zellanzahl nicht eindeutig messbar

Die Ergebnisse der maximalen Kraft, die aufgewendet wird, um die Schäume jeweils um 45 % zu deformieren und damit die zelluläre Struktur im Schauminneren zu analysieren, zeigt deutliche Unterschiede (Abbildung 63). Dabei liegen Schaum 1 und 2 auf nahezu identischem Level mit 595 und 598 N. Schaum 3 weist mit 655 N eine geringfügig und Schaum 4 mit 866 N eine deutlich höhere Kraft auf.

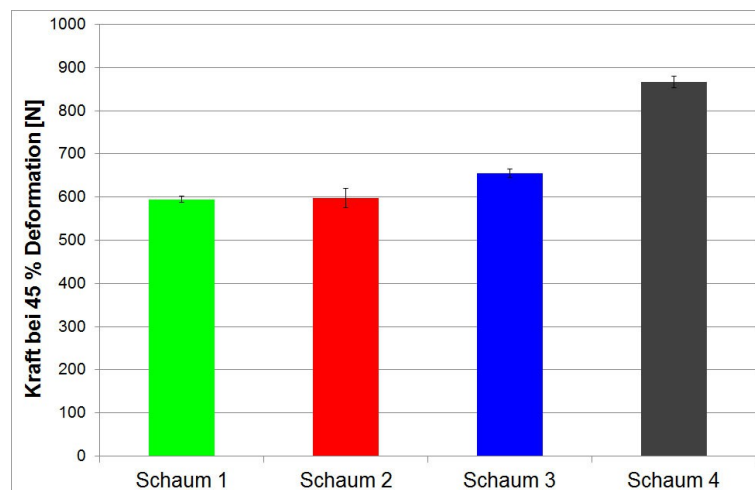


Abbildung 63: Kraft, um Schaummaterialien um 45 % zu deformieren

Abbildung 64 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse des Weißanteils der lichtmikroskopischen Aufnahmen (LM-Aufnahmen). Dabei wird deutlich, dass keine eindeutigen Unterschiede zwischen den einzelnen Schäumen festgestellt werden können.

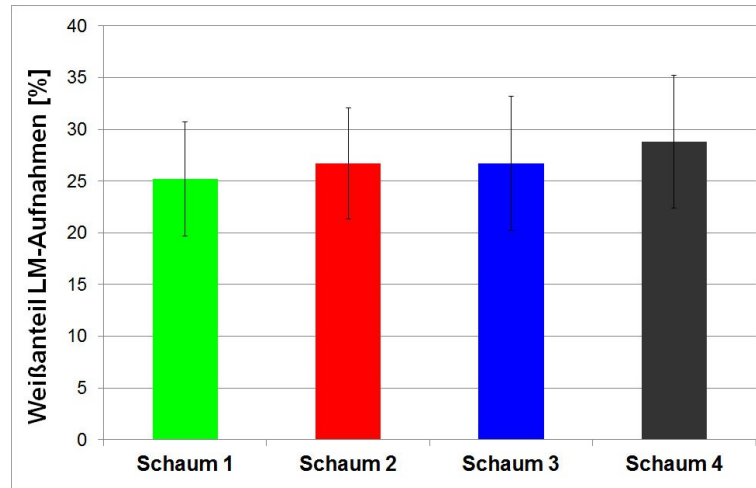


Abbildung 64: Weißanteil [%] der lichtmikroskopischen Aufnahmen

In den nachfolgenden Ergebnissen werden die Zelldurchmesser der zellulären Struktur analysiert: Abbildung 65 zeigt die Verteilungen der Zelldurchmesser der Schäume. Es wurden von jedem Schaum an unterschiedlichen Stellen fünf lichtmikroskopische Aufnahmen erstellt und jeweils rund 1600 Zellen pro Schaum mittels PORE!SCAN-Verfahren analysiert. Die Daten der jeweiligen Schäume sind nicht normalverteilt ($p < 0,05$; K-S-Test), was mittels Boxplot-Darstellung verdeutlicht wird. Da die Schiefen mit Werten zwischen 0,43 und 1,00 mehr als doppelt so groß sind wie die Standardfehler (0,04 bis 0,06), werden die Verteilungen als unsymmetrisch bezeichnet. Da es sich um positive Schiefe-Werte handelt, werden die Verteilungen als rechtsschief bezeichnet. Dies wird dadurch verdeutlicht, dass sich die Daten zu niedrigeren Zelldurchmessern gruppieren (Abbildung 65). Die Mediane der unterschiedlichen Schäume liegen zwischen 86 und 93 μm , die Quartile zwischen 60 und 65 bzw. 120 und 127 μm , sodass die Ergebnisse nahezu identisch sind bzw. keine Unterschiede festgestellt werden können.

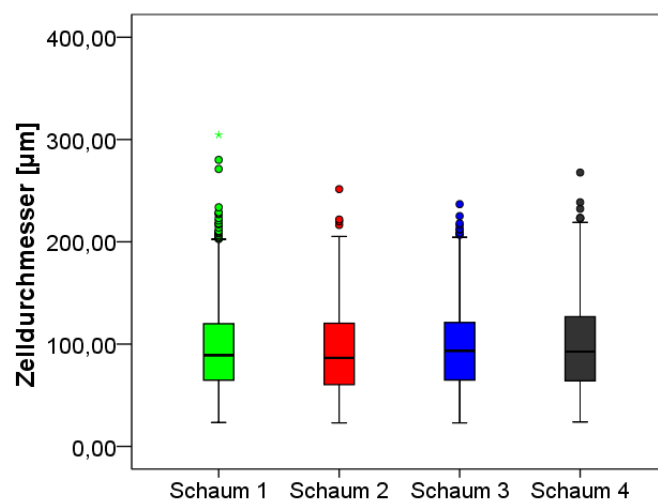


Abbildung 65: Verteilungen der Zelldurchmesser [μm] der mittels PORE!SCAN-Verfahren untersuchten Schäume

Abbildung 66 zeigt exemplarisch eine REM-Aufnahmen von einem der untersuchten Schäume. Zur Bestimmung des Zelldurchmessers der untersuchten Schäume werden jeweils rund 450 Zellen pro Schaummaterial (drei REM-Aufnahmen pro Schaum) analysiert. Die Daten sind nicht normalverteilt ($p < 0,05$; K-S-Test). Gleichfalls wie in den Ergebnissen des PORE!SCAN-Verfahrens zeigt sich, dass sich die Daten zu niedrigeren Zelldurchmessern gruppieren (Abbildung 67). Des Weiteren sind keine signifikanten Unterschiede zwischen Schäumen vorhanden ($p < 0,05$; H-Test nach Kruskal & Wallis).

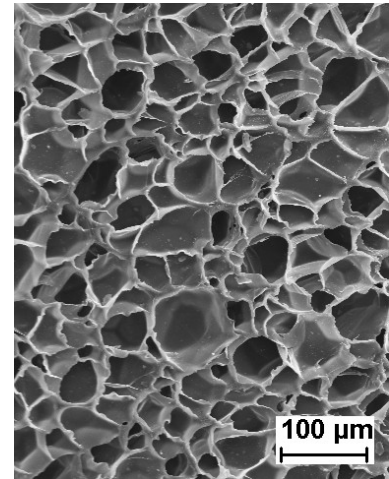


Abbildung 66: Schaum 1

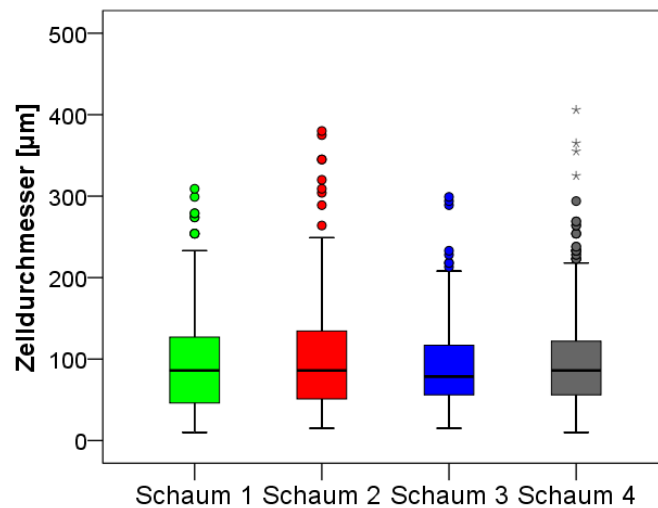


Abbildung 67: Zelldurchmesser der unterschiedlichen Schäume

Abbildung 68 zeigt den Vergleich der Zelldurchmesser, die zum einen mittels 2-D-Verfahren (PORE!SCAN) und zum anderen mittels 3-D-Verfahren (Mikro-CT) am Beispiel von Schaum 4 ermittelt wurden. Der Mittelwert der Messung des 3D-Verfahrens liegt bei 221 µm, wohingegen der Median des 2-D-Verfahrens 93 µm aufweist.

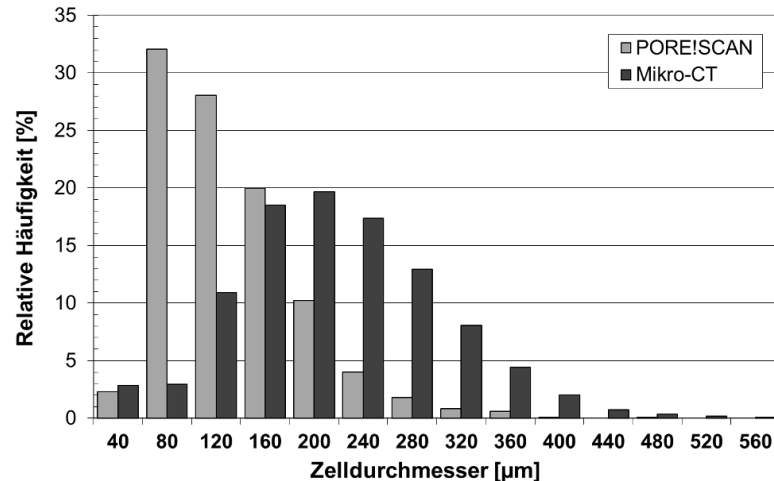


Abbildung 68: Vergleich von 2-D- und 3-D-Verfahren (Schaum 4)

Abbildung 69 zeigt den Weißanteil der Punktebilder, die basierend auf den REM-Aufnahmen erstellt wurden, um die Zellanzahl für die unterschiedlichen Schäume zu bestimmen. Je höher der Weißanteil, desto weniger Zellen wurden mit einem schwarzen Punkt markiert und desto geringer ist demzufolge die Zellanzahl. Der Weißanteil der Schäume zeigt mit Werten von 85 bis 88 % nur sehr geringfügige Unterschiede. Statistisch signifikante Unterschiede werden auf Grund der geringen Anzahl der REM-Aufnahmen (drei pro Schaum) nicht untersucht.

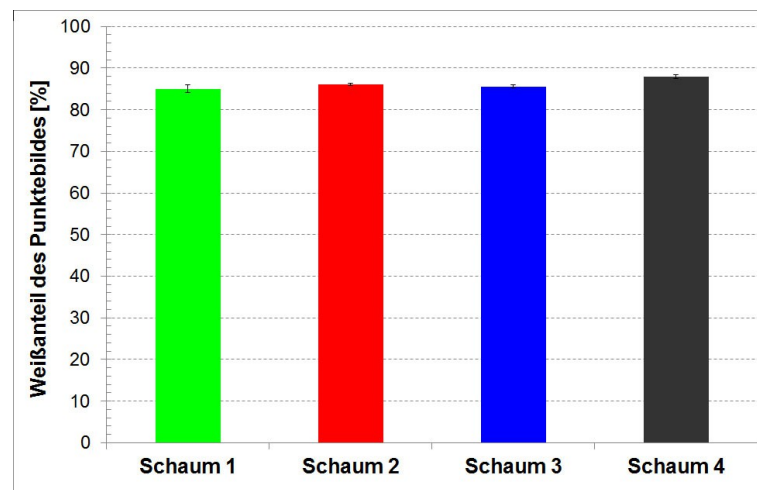


Abbildung 69: Weißanteil des Punktebildes zur Charakterisierung der Zellanzahl

Geschlossenzelligkeit und Poissonzahl von Null

Bei der Analyse des EVA-Schaums, der während des Deformationsprozesses in Wasser lagerte, können keine entweichenden Luftbläschen festgestellt werden (Abbildung 70). Demzufolge ist davon auszugehen, dass es sich um einen geschlossenzelligen Schaum handelt, in dem die komplette in den Zellen vorhandene Luft während des Verformungsprozesses im

Schaum eingeschlossen ist. Im Gegensatz zum EVA entweichen beim PUR-Schaum Luftbläschen, sobald das Material belastet wird, was auf einen offenzelligen Schaum hindeutet (Abbildung 71).

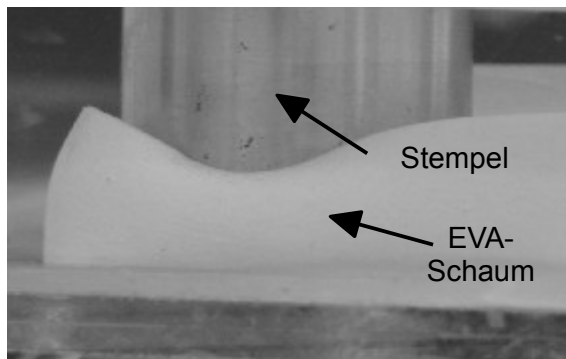


Abbildung 70: EVA-Schaum unter Druckverformung in Wasser

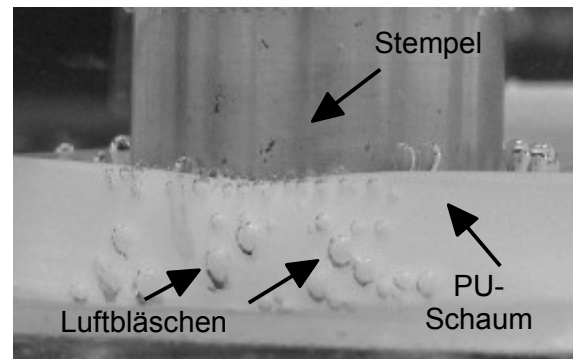


Abbildung 71: PUR-Schaum unter Druckverformung in Wasser

Bei der dynamischen Deformation des EVA-Schaums unter Wasser konnte über die getesteten Zyklen kein Massenzuwachs festgestellt werden (Abbildung 72). Im Gegensatz dazu zeigt sich für den PUR-Schaum ein Anstieg der Masse mit zunehmender Zykluszahl, der sich einem „Sättigungswert“ annähert. Damit bestätigt sich, dass der vorliegende EVA-Schaum geschlossenzellig und der PUR-Schaum im Gegensatz dazu offenzellig ist.

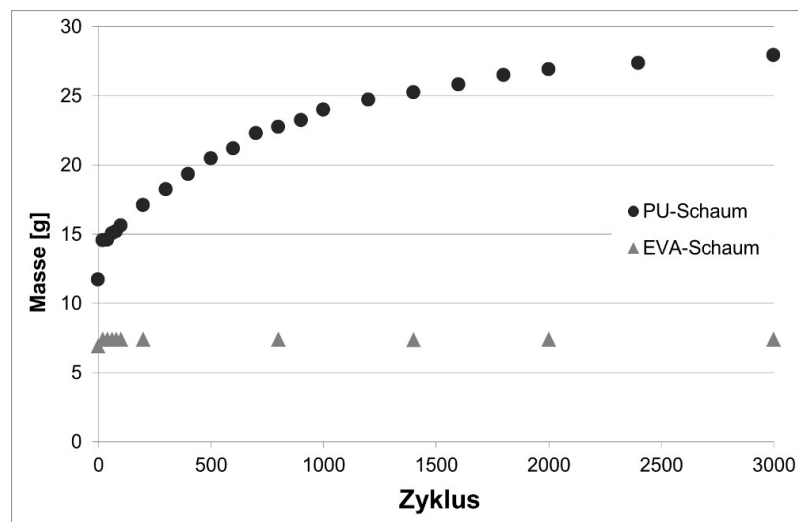


Abbildung 72: Über die Zykluszahl konstante Masse des EVAs und zunehmende Masse des PURs

Die Abbildungen 73 und 74 zeigen die Ergebnisse der optischen 2-D-Verformungsanalyse an einem Schaumprobekörper vor und nach 40 %-iger Verformung. Es kann festgestellt werden, dass sich der Durchmesser der Probe während der Deformation in vertikaler Richtung nicht verändert, sodass eine Poissonzahl von Null ermittelt wird. Des Weiteren zeigt sich, dass die Verformung in der Probe bereits nach 2 s inhomogen wird, sodass in den Messfeldern Schwankungen der axialen Verformung von bis zu 20 % auftreten (Abbildung 75). Die Verformung setzt sich demzufolge nicht homogen im Material, sondern in so genannten

Schichten, die grundsätzlich senkrecht zur Belastungsrichtung verlaufen, fort. Dies bestätigt die Aussagen zweier anderer Autorenschaften (Viot et al. 2005; Weaire & Fortes 1994).

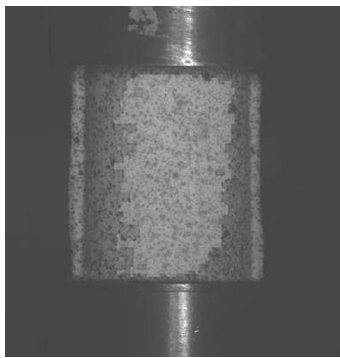


Abbildung 73: Schaum in Ausgangslage

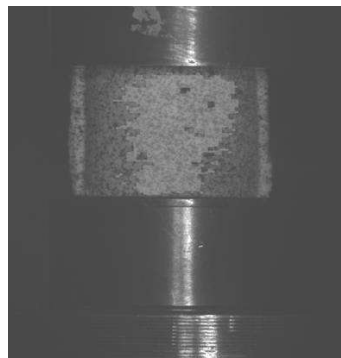


Abbildung 74: Deformierter Schaum

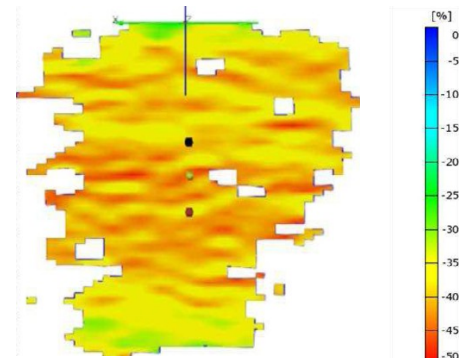


Abbildung 75: Verformungsverteilung bei 40 % Verformung

Abbildung 76 zeigt die Poissonszahl von Schaum 2 bei unterschiedlichen Verformungen. Die Schnittbilder wurden dabei mittels 3-D Mikro-Computertomographie erstellt. Die Poissonszahl zeigt dabei Werte nahe Null (0,07 bis 0,13) auf.

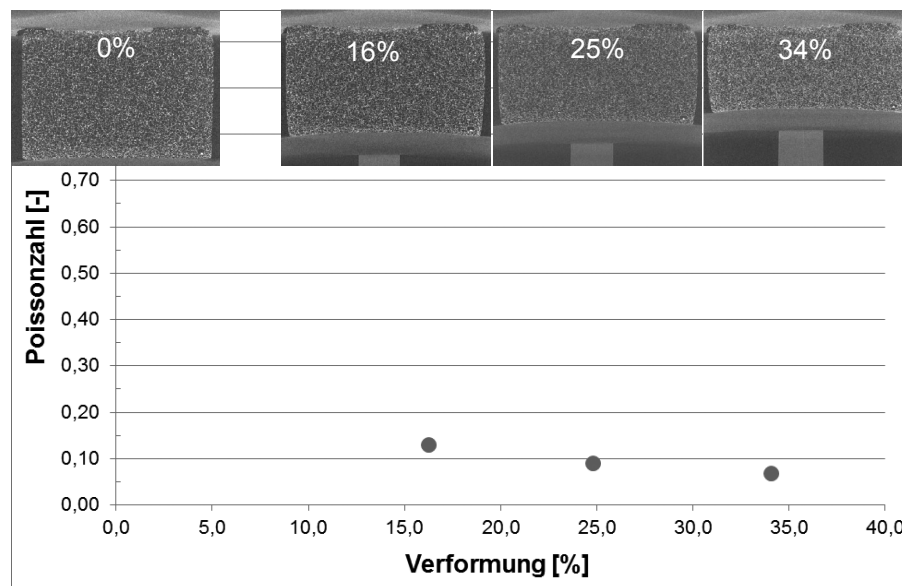


Abbildung 76: Poissonzahl bei unterschiedlichen Verformungen (3-D μ -CT)

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass ein exakter 2-D-Schnitt rekonstruiert und analysiert werden kann. Es ergibt sich allerdings die Schwierigkeit, dass zwischen den einzelnen Schnittbildern die Ebenen geringfügig verschoben werden, da der Probekörper zwischen den einzelnen μ -CT-Aufnahmen manuell über die Kunststoffspritze deformiert wird. Eine Auswertung mittels Grauwertkorrelation ist daher nicht möglich. Die Breiten- und Höhenänderungen zur Ermittlung der Poissonszahl des Schaums wurden aus diesem Grund manuell ermittelt. Ein weiterer Nachteil dieser Methode ist, dass eine einzelne μ -CT-Aufnah-

me mehrere Stunden dauert und eine Analyse bei dynamischer Verformung daher nicht möglich ist.

Abbildung 77 bis 80 zeigen Highspeed-Aufnahmen von Schaum 2 bei unterschiedlichen Deformationen, die bei einer Verformungsgeschwindigkeit von 350 mm/s aufgenommen wurden. Um den Einfluss der Perspektive auf einen zylindrischen Probekörper zu minimieren, wurde nur der vordere Ausschnitt für die Analyse mittels Grauwertkorrelation verwendet. Dabei wird für die mittlere Ausdehnung in horizontaler Richtung ein maximaler Wert von 0,8 % ermittelt, was als vernachlässigbar klein bewertet wird. Daraus resultiert eine Poissonzahl nahe Null.

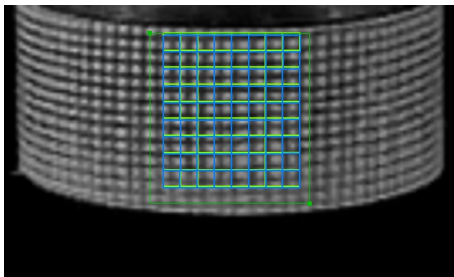


Abbildung 77: Ausgangsposition

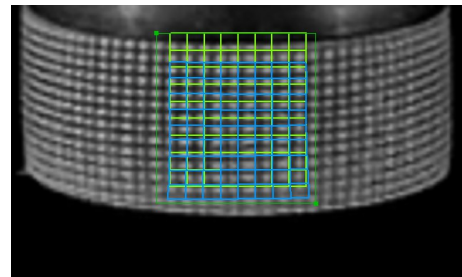


Abbildung 78: Schaum 2 bei $\epsilon = 10 \%$

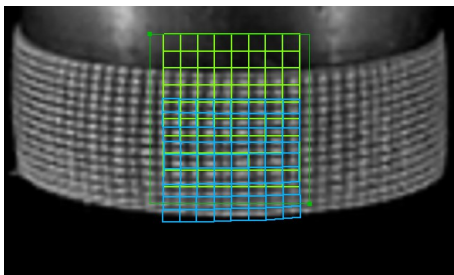


Abbildung 79: Schaum 2 bei $\epsilon = 30 \%$

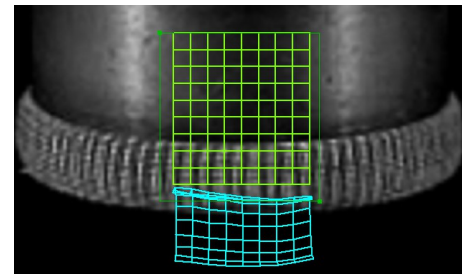


Abbildung 80: Schaum 2 bei $\epsilon = 50 \%$

Strukturveränderungen: Verformung in einzelnen Schichten

Abbildung 81 zeigt die Deformationsanalyse mittels Grauwertkorrelation an lichtmikroskopischen Aufnahmen von Schaum 2, wobei der Schaum um 20 % (3000 μm) verformt wurde. Die Druckverformung erfolgt in einzelnen Schichten bzw. Verformungsbanden, die senkrecht zur vertikalen Belastungsrichtung verlaufen.

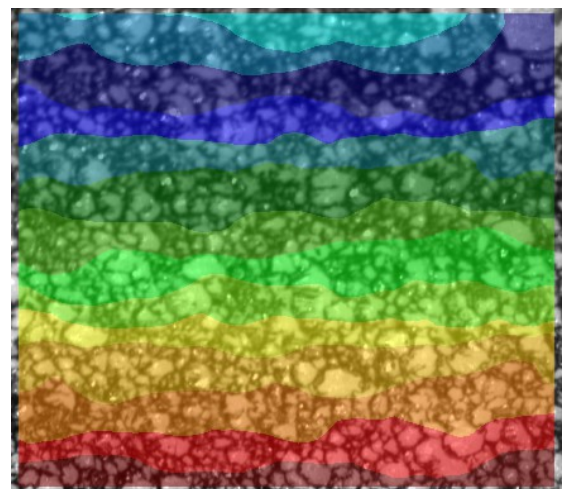


Abbildung 81: Verformungsanalyse mittels Grauwertkorrelation; Belastungsrichtung vertikal

Zudem wird ersichtlich, dass die Verformung in der Mitte des Schaums am geringsten ist und die Bereiche oben (-) und unten (+) sich aufeinander zu bewegen.

Abbildung 82 zeigt sequenzielle Aufnahmen des untersuchten Schaums, die bei 600, 1200, 1800 und 3000 μm Deformation aufgenommen und mittels Grauwertkorrelation analysiert wurden. Dabei charakterisiert ein geringer Koeffizient (rot) ein Versagen bzw. Ausknicken einer Zelle, wohingegen ein großer Koeffizient (grün) eine Verschiebung im Bild beschreibt. Des Weiteren ist erkennbar, dass Regionen mit nahezu undeformierten Zellen auftreten (grüne Bereiche in Abbildung 82). Parallel zu diesen lichtmikroskopischen Aufnahmen wurde der Spannungs-Verformungs-Verlauf des Schaums aufgezeichnet, sodass festgestellt werden kann, dass die Aufnahmen bei 600 und 1200 μm im linear-elastischen Bereich, die Aufnahme bei 1800 μm im Übergang zum Versagensbereich und die letzte Aufnahme im Versagensbereich liegen.

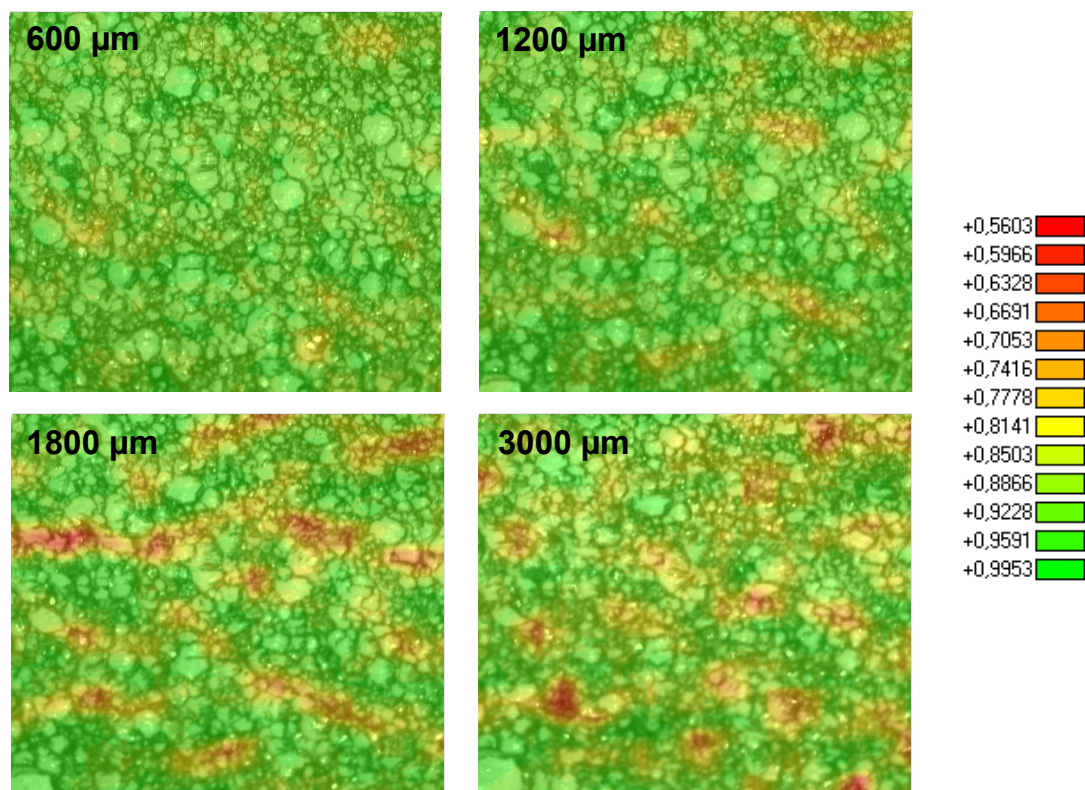


Abbildung 82: Analyse des Korrelationskoeffizienten; Druckverformung in vertikaler Richtung

5.2.2 Matrixphase

5.2.2.1 σ - ϵ -Kurve des massiven Elastomers

Bei der Ermittlung des Verformungsverhaltens des Matrixmaterials ergab sich die Problematik, dass die vorhandene Prüfmaschine Zwick HC10 eine zu geringe Kraft aufweist, um einen Probekörper aus dem massiven Elastomer mit einem Durchmesser von 50 mm zu deformieren.

Aus diesem Grund wurde der Probekörperdurchmesser auf 10 mm verringert (Abbildung 83) und jeweils die Spannungs-Verformungs-Daten von massivem und geschäumtem Material berechnet, um die Ergebnisse in Relation setzen zu können. Bei der Durchführung der Versuche an dem massiven Elastomer konnte eine Veränderung der Probekörpergeometrie in Form einer irreversiblen, plastischen Verformung festgestellt werden.

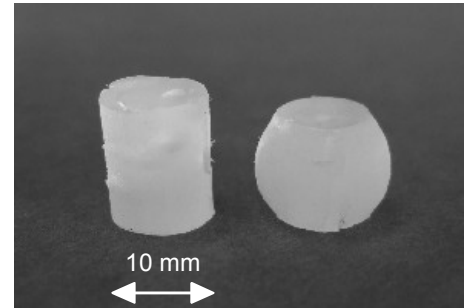


Abbildung 83: Probekörper vor (links) und nach (rechts) der Belastung

Abbildung 84 zeigt den σ - ϵ -Verlauf des massiven Elastomers bei der Verformungsgeschwindigkeit von 350 mm/s. Es spiegelt sich der typische Verlauf von linear-elastischem Bereich, Versagens- und Verdichtungsbereich wie beim Schaum wider, wobei die Spannungswerte deutlich höher liegen als beim Schaummaterial.

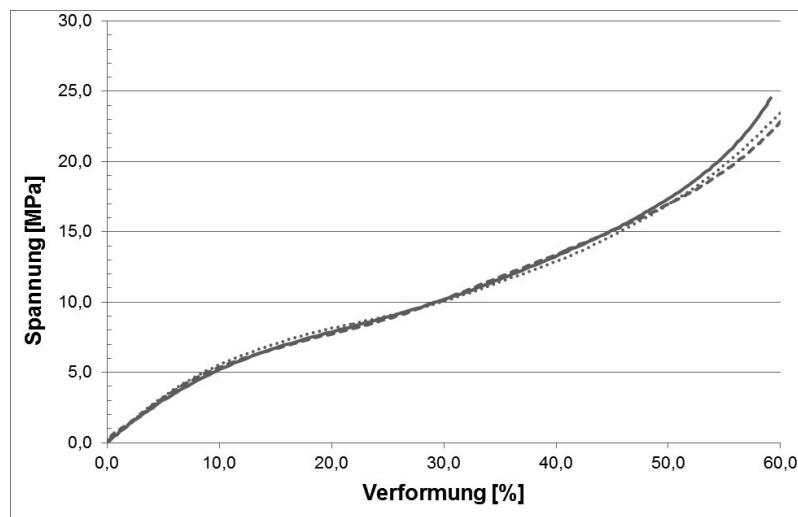


Abbildung 84: σ - ϵ -Verhalten des massiven Elastomers; drei Probekörper

5.2.2.2 Chemischer Aufbau und Morphologie der Schäume identisch

Abbildung 85 zeigt die Extinktionsspektren der unterschiedlichen Schäume und des massiven Elastomers, wobei die angeregten Banden erläutert sind. Dabei wird ersichtlich, dass die Extinktionsspektren der unterschiedlichen Materialien nahezu identisch verlaufen.

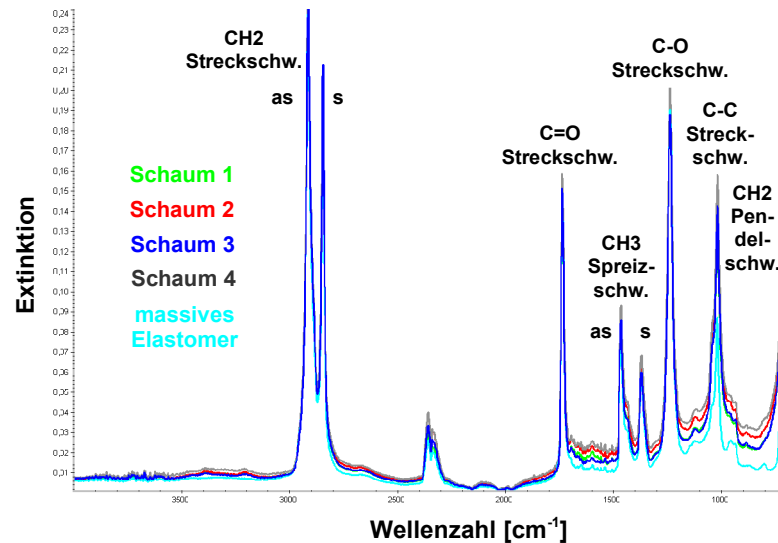


Abbildung 85: Extinktionsspektren der vier EVA-Schäume und des massiven Elastomers (as: asymmetrisch; s: symmetrisch)

Abbildung 86 zeigt den Verlauf des Verlustmoduls für die unterschiedlichen Schäume und das massive Elastomer. Alle fünf Materialien zeigen einen nahezu identischen Verlauf mit einem Peak bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das massive Elastomer weist gegenüber den geschäumten Materialien eine höhere Intensität für den zweiten Peak bei rund $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf.

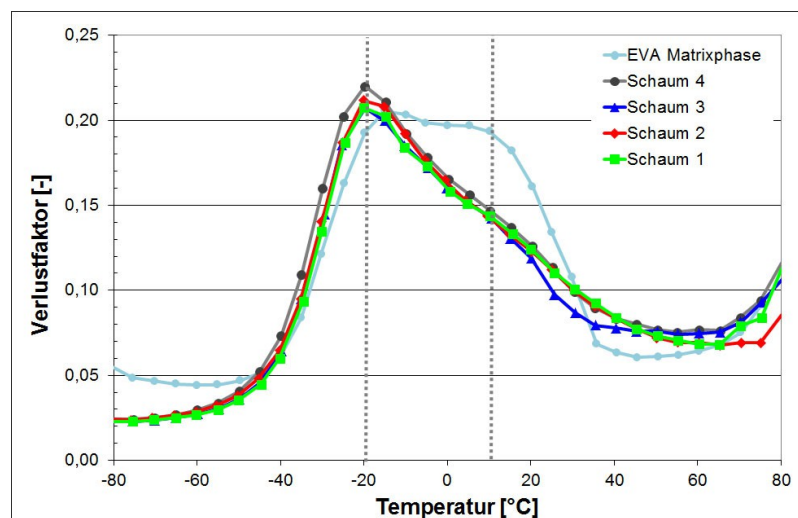


Abbildung 86: Verlustfaktor der untersuchten Schäume

5.2.2.3 Verformungsgeschwindigkeit: Unterschiede bei Schaum & Matrix

Abbildung 87 zeigt die σ - ϵ -Kurven des massiven Elastomers (Matrixphase) bei unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten. Es lässt sich eine deutliche Zunahme der Spannungswerte mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit feststellen, was anhand des E-Moduls und des Energieeintrags in Tabelle 2 verdeutlicht wird. Für beide Parameter wird ein guter Zusammenhang zur Verformungsgeschwindigkeit ermittelt ($R = 0,78$ bzw. $0,90$). Dies bestätigt die Ergebnisse von Dalrymple und Choi (2007), auf Grund derer ebenfalls ein logarithmi-

scher Zusammenhang zur Verformungsgeschwindigkeit untersucht wurde.

Des Weiteren zeigt sich, dass sich die Kurvensteigungen in Tabelle 2 zwischen den unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten nur geringfügig unterscheiden und damit quasi parallel verlaufen.

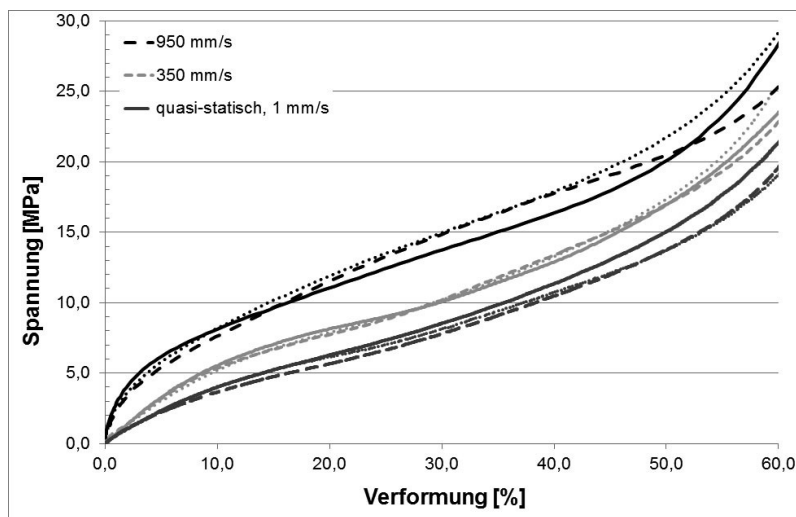


Abbildung 87: σ - ϵ -Verhalten des massiven Elastomers in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit; je drei Probekörper

Tabelle 2: Kennwerte zur Beschreibung der σ - ϵ -Kurven in Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit

	E-Modul	Energieeintrag	Kurvensteigung zw. 5 und 60 % Verformung
	[MPa]	[J]	[MPa]
1 mm/s	46 ± 1	4,7 ± 0,2	32,2 ± 2,2
350 mm/s	63 ± 2	6,0 ± 0,0	37,0 ± 1,4
950 mm/s	116 ± 7	7,6 ± 0,2	39,6 ± 2,9

Abbildung 88 zeigt die σ - ϵ -Kurvenverläufe bei den unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten für die Schaummaterialien exemplarisch anhand Schaum 4. Im Vergleich zum geschwindigkeitsabhängigen Verhalten des reinen Elastomers, bei dem sich der komplette Kurvenverlauf zwischen den drei Verformungsgeschwindigkeiten unterscheidet, zeigt sich dies nur für 1 und 350 mm/s bzw. 1 und 950 mm/s. Die σ - ϵ -Kurven von 350 und 950 mm/s unterscheiden sich im anfänglichen Verformungsbereich, wobei eine Abhängigkeit zur Verformungsgeschwindigkeit ermittelt werden kann ($R = 0,87$ bzw. $0,98$). Ab rund 40 % Deformation überdecken sich die Kurven, was darin begründet werden kann, dass die Druckprüfmaschine nicht bis zur Endverformung von 60 % die Geschwindigkeit aufrechterhalten konnte.

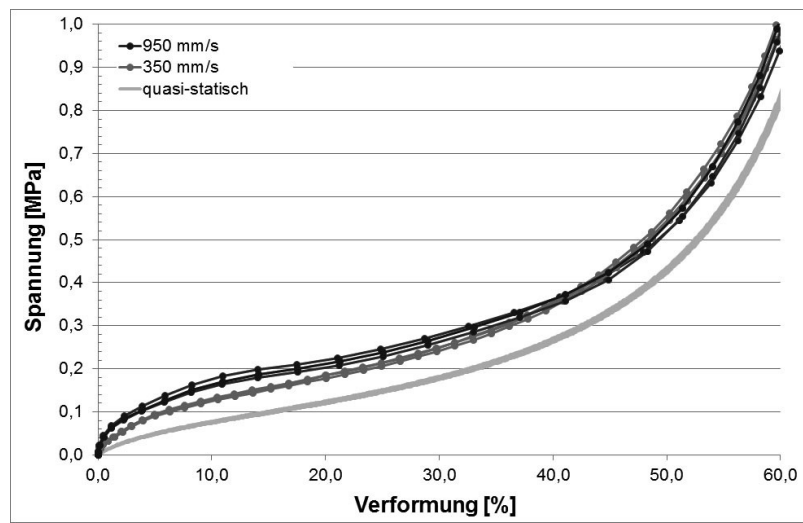


Abbildung 88: σ - ϵ -Kurven für Schaum 4 bei unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten

6 Diskussion

6.1 Geringfügiger Unterschied der σ - ε -Kurven der Schäume

Sowohl der E-Modul als auch die Versagensspannung σ_{el}^* bzw. die Spannung bei 5 % Verformung der untersuchten Schäume unterscheiden sich nur geringfügig, sodass sich ein Zusammenhang zur Dichte nicht feststellen lässt. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass unter der Annahme, dass die Schäume aus einem identischen Matrixmaterial aufgebaut sind (Nachweis in Kapitel 6.2.2.1), die Eigenschaften des Matrixmaterials den linear-elastischen Bereich der Schäume dominieren. Dies bestätigt die Aussagen von Viot et al. (2005), für die sich das Verformungsverhalten von Schaummaterialien mit identischer Polymerphase, aber unterschiedlicher Dichte erst nach Überschreiten des linear-elastischen Bereichs verändert.

6.2 Einflüsse auf das mechanische Verformungsverhalten der Schaummaterialien

6.2.1 Gasphase

6.2.1.1 Schaumdichte als Einflussparameter

Die deutlichen Unterschiede zwischen den Schäumen hinsichtlich der Schaumdichte bestätigen, dass die Schaumdichte einen Einflussparameter auf das mechanische Verhalten des Schaums darstellt, die im Modell berücksichtigt werden soll.

6.2.1.2 Schaumhärte als Einflussparameter

Basierend auf vorangegangenen Studien (Brückner 01.2009; Shih et al. 2011; Yick et al. 2010) wird ein direkter Zusammenhang von Schaumdichte und Härte erwartet. Die nicht signifikanten Härte-Unterschiede zwischen Schaum 1 und 2 lassen sich im Messverfahren begründen, da die Härte nur an der Oberfläche des Schaums gemessen wird und auf Grund des viskoelastischen Verhaltens des Materials erfahrungsgemäß eine Varianz vom Hersteller von 4 Asker C angegeben wird. Diese beiden Schäume sind sich demzufolge sehr ähnlich.

Untersucht man trotz des nicht signifikanten Härte-Unterschieds von Schaum 1 und 2 den Zusammenhang von Schaumdichte und Härte, so zeigt sich eine Zunahme der Härte mit steigender Schaumdichte ($R = 0,98$). Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass für die Herstellung eines härteren Schaums mehr Matrixmaterial in die Werkzeugform gefüllt wird, was sich in einer höheren Schaumdichte widerspiegelt. Um diese Aussage allerdings definitiv zu bestätigen, muss untersucht werden, ob die unterschiedlichen Schäume aus dem gleichen Matrixmaterial aufgebaut sind (Kapitel 6.2.2.1). Analysiert man den Zusammenhang der Härte zum Energieeintrag der σ - ε -Kurven, so zeigt sich eine sehr gute Korrelation mit

$R = 0,99$. Damit stellt die Härte eindeutig einen Einflussfaktor auf das σ - ε -Verhalten der Schäume dar.

6.2.1.3 Zelluläre Struktur

Weitere Methoden zur eindeutigen Bestimmung von Zelldurchmesser und Zellanzahl

Auf Grund der Unterschiede der maximalen Kraft, die zur Deformation der Schäume um 45 % aufgewendet wird, wird ausgeschlossen, dass sich die Schäume nur an den Außenflächen unterscheiden und sich bei zunehmender Dichte das zusätzliche Matrixmaterial an den Außenflächen anhäuft, was beispielsweise in Unterschieden der Härte resultiert, da diese an der Schaumoberfläche gemessen wird. Die Schäume unterscheiden sich demzufolge im Schaumkern. Ein Integralschaum-Charakter, bei dem die Schäume im Kern gleiche Dichten und in den Außenflächen unterschiedliche Dichten aufzeigen, wird daher ausgeschlossen.

Die Ursache, dass bei der Analyse des Weißanteils der lichtmikroskopischen Aufnahmen keine eindeutigen Unterschiede zwischen den einzelnen Schäumen festgestellt werden konnten, lässt sich darin begründen, dass das Rußspray insbesondere sehr kleine Zellen verklebte bzw. auch Stege schwarz eingefärbt wurden und damit die Auswertung beeinflusst wurde.

Für die Analyse des Zelldurchmessers anhand der lichtmikroskopischen Aufnahmen mittels PORE!SCAN-Verfahrens wird darauf hingewiesen, dass bei diesem Verfahren der Grenzbereich zwischen zwei Poren über zwei Linien (grüne Linien in Abbildung 25) detektiert wird. Der Abstand zwischen diesen zwei Linien ist dabei auf ein Pixel festgesetzt. Aus diesem Grund sind Unterschiede hinsichtlich der Zellwanddicke mit diesem Verfahren grundsätzlich nicht messbar. Diese Approximation kann auch der Grund dafür sein, dass für die vorliegenden Schäume, insofern sie sich nur geringfügig unterscheiden, keine Unterschiede hinsichtlich des Zelldurchmessers ermittelt wurden.

Auch bei den REM-Aufnahmen - mit einer höheren Vergrößerung als die der lichtmikroskopischen Aufnahmen - wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den vorliegenden Schäumen ermittelt. Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Verfahren (Lichtmikroskop vs. REM) wird deutlich, dass die Mediane und Quartile der Zelldurchmesser der jeweiligen Schäume nahezu identisch sind. Dies lässt darauf schließen, dass die beiden Verfahren grundsätzlich valide sind. Auf Grund der Einfachheit des Verfahrens können lichtmikroskopische Aufnahmen in Kombination mit dem PORE!SCAN-Verfahren folglich einer aufwändigeren REM-Analyse bevorzugt angewendet werden. Es wird weiterhin ersichtlich, dass eine Beeinflussung der Messergebnisse durch das Besprühen der Probekörper mittels Rußspray und die Approximation der PORE!SCAN-Analyse demzufolge vernachlässigbar sind.

Zieht man allerdings den Vergleich zu einem 3-D-Verfahren wie der verwendeten 3-D- μ -CT, unterscheiden sich die Zelldurchmesser von 2 zu 3-D-Verfahren erheblich. Diese Differenz begründet sich darin, dass bei einem 2-D-Verfahren (sowohl Lichtmikroskopie als auch REM) die dreidimensionale Zelle an einer zufällig gewählten Stelle geschnitten wird, sodass zum größten Teil nicht der wahre Zelldurchmesser ermittelt wird. Dies wird auch als „Tomatenscheibenprinzip“ bezeichnet. Daraus lässt sich folgern, dass die beiden 2-D-Verfahren auf Grund der Zweidimensionalität an ihre Grenzen gelangen und daher für die vorliegende Problematik ungeeignet sind. Auf Grund der hohen Kosten wurde nur ein Schaum mittels 3-D- μ -CT analysiert, sodass noch validiert werden muss, ob sich hiermit Unterschiede zwischen den vier Schäumen tatsächlich feststellen lassen.

Um die Problematik des Vermessens der einzelnen Zellen zu umgehen, wurde die Zellanzahl mittels „Punktemethode“ ermittelt. Denn der Vorteil dieser Methode gegenüber den vorangegangenen Messungen der Zelldurchmesser liegt darin, dass keine exakten Abmaße bestimmt werden, sondern nur das „Vorhandensein“ einer Zelle markiert wird. Die Problematik des 2-D-Schnitts einer 3-D-Volumenzelle wird in gewissem Maße umgangen. Da allerdings auch hier keine Unterschiede zwischen den Schäumen ermittelt werden konnten, wird diese Methodik für die vorliegenden Schäume als ungeeignet beurteilt, um Unterschiede der Zellstruktur zu analysieren.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine eindeutige Analyse des Zelldurchmessers für die vorliegenden Schäume als sehr schwierig erweist. Dies deutet darauf hin, dass sich die vorliegenden Schäume nur geringfügig unterscheiden. Aus diesem Grund kann der Zelldurchmesser oder die Zellanzahl als Einflussgröße auf das σ - ε -Verhalten der Schäume basierend auf den vorangegangenen Ergebnissen nicht berücksichtigt und nicht in das Modell integriert werden.

Geschlossenzelligkeit und Poissonzahl von Null als Voraussetzungen für das Modell

Anhand der beiden Versuche lässt sich feststellen, dass die vorliegenden Schäume ein geschlossenes System sind, bei dem sowohl keine Luft entweicht als auch kein Wasser vom Schaum absorbiert wird. Dies bedeutet, dass die in den Zellen vorhandene Luft im Schaum eingeschlossen ist und dem Deformationsprozess unterliegt.

Für die Poissonzahl lässt sich anhand aller drei Verfahren (optische 2-D-Verformungsanalyse, μ -CT-Aufnahmen und Highspeed-Aufnahmen) eine Poissonzahl nahe Null ermitteln, sodass sich die Schäume nicht quer zur Belastungsrichtung ausdehnen. Der Nachteil der optischen 2D-Verformungsanalyse mittels ARAMIS besteht darin, dass der Versuch nur quasi-statisch mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 2,5 mm/s durchgeführt wurde. Der Vorteil der μ -CT liegt darin, dass ein exakter 2D-Schnitt rekonstruiert und analysiert wird. Es er-

gab sich allerdings die Schwierigkeit, dass zwischen den einzelnen Schnittbildern die Ebenen geringfügig verschoben wurden, da der Probekörper zwischen den einzelnen μ -CT-Aufnahmen manuell verformt wurde. Eine Auswertung mittels Grauwertkorrelation war daher nicht möglich. Die Breiten- und Höhenänderungen zur Ermittlung der Poissonzahl des Schaums wurden aus diesem Grund manuell ermittelt. Ein weiterer Nachteil dieser Methode besteht darin, dass eine einzelne μ -CT-Aufnahme mehrere Stunden dauert und eine Analyse bei dynamischer Verformung daher nicht möglich ist. Der Vorteil der Highspeed-Aufnahmen liegt darin, dass diese bei der relevanten Verformungsgeschwindigkeit von 350 mm/s aufgenommen werden können und damit unter realistischen Bedingungen geprüft wurde.

Zusammenfassend sind damit zwei Voraussetzungen zur Verwendung des ausgearbeiteten Modells bestätigt. Die im Schaum vorhandene Luft bleibt unter Deformation im Schaum eingeschlossen und verhält sich dabei volumenkompressibel. Das Luftfeder-Modell kann folglich zur Modellierung des Gas-Anteils für das Verhalten der in den Zellen eingeschlossen Luft angesetzt werden.

Inhomogene Strukturveränderung in Schichten vertikal zur Belastung

In den Ergebnissen der Strukturveränderungen wird deutlich, dass die Druckverformung in einzelnen Schichten bzw. Verformungsbanden erfolgt, die senkrecht zur vertikalen Belastungsrichtung verlaufen, was die Ergebnisse der 2-D-Verformungsanalyse und ebenso diverse Literaturstellen (Ramsteiner et al. 2001; Weaire & Fortes 1994; Viot et al. 2005) bestätigt. Der Vorteil gegenüber der 2-D-Verformungsanalyse besteht darin, dass dabei einzelne Zellen sichtbar sind.

Des Weiteren wird ersichtlich, dass ein Ausknicken der Zellen unabhängig von der Zellgröße erfolgt, da sowohl Bereiche mit vielen kleinen Zellen als auch Bereiche mit größeren Zellen versagen. Damit kann die Aussage von Weaire und Fortes (1994), dass das Versagen in der Schicht mit der geringsten Dichte bzw. größeren Poren stattfindet, widerlegt werden. Zudem lassen sich Regionen mit nahezu undeformierten Zellen (grüne Bereiche in Abbildung 82) ermitteln, was die Aussage von Ramsteiner et al. (2001) bestätigt. Auf Grund einer zu geringen Vergrößerung ist es allerdings nicht möglich, den genauen Versagensmechanismus einer einzelnen Zelle und damit das Initiieren und Fortschreiten des Versagens zu analysieren.

Für den Vergleich der lichtmikroskopischen Aufnahmen mit dem δ - ε -Verlauf wird deutlich, dass erste lokale Deformationen, die in einem Ausknicken resultieren, mit Beginn der Verformung und nicht erst oberhalb des linear-elastischen Bereiches stattfinden. Dies bestätigt die Aussage von Fuss (2009), dass erste Zellstege weit unterhalb der elastischen Versagensspannung δ_{el}^* versagen.

Es wird darauf hingewiesen, dass diese Analyse bei einer quasi-statischen Verformungsge-

schwindigkeit (20 $\mu\text{m/s}$) durchgeführt wurde, da mit diesem Prüfaufbau keine höheren Verformungsgeschwindigkeiten realisierbar sind. Eine Prüfung bei höherer Verformungsgeschwindigkeit ist wünschenswert, um die Strukturveränderung auch bei realistischen Prüfbedingungen analysieren zu können.

6.2.2 Matrixphase

6.2.2.1 *EVA-Elastomer als Matrixphase der untersuchten Schäume*

Die Analyse der angeregten Banden und der Vergleich mit den Ergebnissen von Verdejo (10.2003) bestätigt, dass es sich bei dem vorliegenden Material um eine Ethylen/Vinylacetat-Elastomer (EVA) handelt. Da die IR-Spektren der vier Schäume und der Matrix nahezu identisch verlaufen (Abbildung 85), kann daraus gefolgert werden, dass die unterschiedlichen Schäume aus der gleichen Matrixphase aufgebaut sind. Weiterhin bestätigt sich damit, dass bei einem dichteren bzw. härteren Schaum mehr Matrixmaterial in die Werkzeugform eingefüllt wird. Dies deckt sich mit den Aussagen von Dubois et al. (2002).

Auch beim Vergleich des ermittelten Verlustmodul-Verlaufes in Abbildung 86 mit dem Verlauf eines EVA-Schaums der Dichte $0,86 \text{ g/cm}^3$ und 12 % Vinylacetat-Anteil in einer Untersuchung von Rodríguez-Pérez und De Saja (2000) bestätigt sich, dass es sich bei den vorliegenden Materialien um EVA-Schäume handelt. Da sich eine Überdeckung des Verlustmodul-Verlaufs der untersuchten Schäume und des Matrixelastomers feststellen lässt, kann gefolgert werden, dass die Materialien einen identischen Vinylacetat-Anteil und eine identische Kristallinität aufweisen und somit die untersuchten Schäumen aus dem identischen EVA-Matrixmaterial aufgebaut sind (Rodríguez-Pérez et al., 1997; Rodríguez-Pérez & De Saja, 2000). Dies untermauert die vorangegangenen Ergebnisse der IR-Spektroskopie.

6.2.2.2 *Geschwindigkeitsabhängigkeit von Matrixphase und Schaum*

Aus den σ - ϵ -Kurven des reinen Elastomers (Matrixphase) lässt sich folgern, dass sich eine Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit nur in einem unterschiedlichen E-Modul begründet und der weitere Kurvenverlauf mit nahezu identischer Steigung weiter verläuft. Die Abhängigkeit des E-Moduls von der Verformungsgeschwindigkeit bestätigt die Aussagen verschiedener Autorenschaften (Ouellet et al. 2006; Shariatmadari 2009; Tedesco et al. 1993; Wismans et al.; Zhang et al. 1998).

6.3 Modell

6.3.1 Voraussetzungen des Modells

Laut Gibson und Ashby (2001) zählen zu den Voraussetzungen für die Verwendung des in Kapitel 4.3 ausgewählten Modells eine inkompressible Matrixphase, Geschlossenzelligkeit der zellulären Struktur und keine Querausdehnung bzw. eine Poissonzahl von Null.

In Kapitel 6.2.2.1 wurde anhand des chemischen Aufbaus und der Morphologie ermittelt, dass die Matrixphase der Schäume ein EVA-Elastomer bildet. Da Elastomere laut Röttemeyer & Sommer (2006) grundsätzlich inkompressibel sind, ist die erste Voraussetzung für die Verwendung des gewählten Modells erfüllt.

Die Geschlossenzelligkeit des vorliegenden EVA-Schaums wurde anhand zweier Tests in Kapitel 6.2.1.3 untersucht. Im ersten Test wurde der Schaum in Wasser liegend deformiert. Da keine entweichenden Luftbläschen festgestellt werden konnten, wurde gefolgert, dass es sich um einen geschlossenzelligen Schaum handelt. Im zweiten Test wurde der Schaum in Wasser lagernd dynamisch getestet. Hier konnte kein Massenzuwachs festgestellt werden, sodass dies die vorhergehende Aussage bestätigte. Demzufolge ist der Schaum geschlossenzellig, sodass die im Schaum vorhandene Luft in den Zellen eingeschlossen bleibt und unter Druck nicht aus den Zellen gedrückt wird.

Ebenfalls in Kapitel 6.2.1.3 wurde die Querausdehnung bzw. die Poissonzahl mittels optischer 2-D-Verformungsanalyse, μ -CT-Aufnahmen und Highspeed-Aufnahmen untersucht. In allen drei Analysen wurde eine Poissonzahl nahe Null bzw. keine Querausdehnung ermittelt. Daraus wurde gefolgert, dass sich die im Schaum eingeschlossene Luft volumenkompessibel verhält. Basierend auf diesen beiden Voraussetzungen wird als Berechnung für das Spannungsverhalten des in den Zellen eingeschlossenen Gases das Luftfeder-Modell angesetzt.

6.3.2 Modellgenerierung – Basismodell plus Einflussfaktoren

Wie bereits erläutert – bildet das Modell nach Gibson und Ashby (2001) die Grundlage für die Generierung des neuen Modells:

$$\sigma_s(\epsilon) = \sigma_p(\epsilon) + \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - R} \quad (8)$$

6.3.2.1 Einflussfaktoren der Gasphase

Dichte als Einflussfaktor im Modell

Das Modell beinhaltet den Parameter relative Dichte R . Dieser wird über das Verhältnis von Schaumdichte ρ_s zu Polymerdichte ρ_p bestimmt, sodass gilt (Gleichung 18):

$$\sigma_s(\epsilon) = \sigma_p(\epsilon) + \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - \frac{\rho_s}{\rho_p}} \quad (18)$$

mit ρ_s : Schaumdichte [g/cm³]

ρ_p : Polymerdichte [g/cm³]

In den Ergebnissen bestätigte sich eine Abhängigkeit des mechanischen Schaum-Verformungs-Verhaltens vom Parameter Schaumdichte ρ_s . Da die vorliegenden Plattenmaterialien die gleiche Grundfläche (120 x 120 mm) aufwiesen, lässt sich dieser Parameter über die jeweilige Plattendicke und Masse bestimmen. Zudem kristallisierte sich in Kapitel 5.2.2.2 heraus, dass die vorliegenden Schäume aus der identischen Matrixphase aufgebaut sind, sodass als Polymerdichte die Dichte des massiven EVA-Materials (ρ_p : 0,81 g/cm³) eingesetzt wird. Für das Modell ergibt sich (Gleichung 19):

$$\sigma_s(\epsilon) = \sigma_p(\epsilon) + \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - \frac{m_s}{14400 \text{ mm}^2 * d * 0,81 \text{ g/cm}^3}} \quad (19)$$

mit m_s : Masse des Schaum-Plattenmaterials

d : Plattendicke [mm]

Härte mit eingeschränktem Zusammenhang zur Dichte

Im Stand der Technik wurde für den Parameter Härte ein proportionaler Zusammenhang zur Schaumdichte erwartet. Da allerdings für Schaum 1 und 2 keine signifikanten Unterschiede festgestellt wurden, lässt sich nur eingeschränkt ein Zusammenhang zur Schaumdichte ermitteln (da $n = 3$). Es ergibt sich nachfolgende Berechnungsformel (Gleichung 20):

$$\rho_s = 0,0055 \frac{\text{g/cm}^3}{\text{AskerC}} * H - 0,1073 \text{ g/cm}^3 \quad (20)$$

mit H : Härte des Schaum-Plattenmaterials [Asker C]

Es ist darauf zu achten, dass die Schaumhärten im Bereich von 40 bis 70 Asker C liegen. Ist dies nicht der Fall, sollte eine alternative Härtemessmethode angewendet werden.

Für das Modell ergibt sich (Gleichung 21):

$$\sigma_s(\epsilon) = \sigma_p(\epsilon) + \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - \frac{0,0055 \frac{\text{g/cm}^3}{\text{AskerC}} * H - 0,1073 \text{ g/cm}^3}{0,81 \text{ g/cm}^3}} \quad (21)$$

Zelldurchmesser und Zellanzahl ohne Berücksichtigung im Modell

Wie aus dem Stand der Technik ersichtlich, wird ein Zusammenhang von Zelldurchmesser

bzw. Zellanzahl und dem σ - ϵ -Verhalten des Schaums erwartet. Für alle vier vorliegenden EVA-Schäume konnten allerdings keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Zelldurchmessers und der Zellanzahl mit den verwendeten Methoden ermittelt werden. Aus diesem Grund werden diese Parameter nicht im Modell berücksichtigt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass zukünftig das Bestreben besteht, den Zelldurchmesser eindeutig zu bestimmen, um diese Parameter gegebenenfalls in das Modell integrieren zu können.

6.3.2.2 Einflussfaktoren der Matrixphase

Identische Elastomermatrix für alle vier Schäume

Entsprechend der Literatur wird bei einer unterschiedlichen Elastomermatrix ein unterschiedliches σ - ϵ -Verhalten des Schaums erwartet. Für die vorliegenden Schäume wurde allerdings ein identischer chemischer Aufbau und eine identische Morphologie der Elastomermatrix ermittelt, sodass alle vier Schäume aus dem identischen EVA-Elastomer aufgebaut sind. Dies bedeutet für das Modell, dass als Spannungs-Anteil der Polymerphase σ_p die Spannungs-Daten des massiven EVA-Elastomers zur Modellierung aller vier Schäume eingesetzt werden (Gleichung 22). Dies bedeutet, dass sich ein unterschiedlicher δ - ϵ -Verlauf der Schäume in einem jeweils unterschiedlichen Gasanteil begründet.

$$\sigma_s(\epsilon) = \sigma_{EVA}(\epsilon) + \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - \frac{0,0055 \frac{g/cm^3}{AskerC} * H - 0,1073 g/cm^3}{0,81 g/cm^3}} \quad (22)$$

mit $\sigma_{EVA}(\epsilon)$: Spannung des EVA- Elastomers [MPa]

In dem Modell von Gibson und Ashby (2001) wird der Anteil der Polymerphase mit dem σ - ϵ -Verhalten des elastomeren Gerüsts beschrieben. Da allerdings in der vorliegenden Arbeit nur ein massives EVA-Elastomer (Blockmaterial) vorhanden ist, müssen die Spannungsdaten mit einem Faktor multipliziert werden, um dies zu berücksichtigen. Für das Modell ergibt sich (Gleichung 23):

$$\sigma_s(\epsilon) = M * \sigma_{EVA}(\epsilon) + \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - \frac{0,0055 \frac{g/cm^3}{AskerC} * H - 0,1073 g/cm^3}{0,81 g/cm^3}} \quad (23)$$

mit M: Faktor, der den massiven Aufbau der Polymerphase berücksichtigt [%]

Verformungsgeschwindigkeitsabhängigkeit des Elastomers

In der Literatur zeigte sich eine Abhängigkeit der σ - ϵ -Kurven des Matrixelastomers von der Verformungsgeschwindigkeit. Des Weiteren stellten Gibson und Ashby (2001) fest, dass der

Anteil des in den Zellen eingeschlossenen Gases verformungsrate-unabhängig ist, sodass sich die Abhängigkeit des Schaums von der Verformungsgeschwindigkeit in der Abhängigkeit der Matrix von der Verformungsgeschwindigkeit begründen lässt. Demzufolge ergibt sich für das Modell (Gleichung 24):

$$\sigma_s(\epsilon, v) = M * \sigma_{EVA}(\epsilon, v) + \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - \frac{0,0055 \frac{g/cm^3}{AskerC} * H - 0,1073 g/cm^3}{0,81 g/cm^3}} \quad (24)$$

mit v : Verformungsgeschwindigkeit [mm/s]

Bestimmung von Faktor M

Um den Faktor M im entwickelten Modell zu bestimmen, wird die Formel wie folgt umgestellt und die experimentell ermittelten Spannungsdaten der Schaummaterialien und des massiven EVA-Elastomers bei der sportspezifischen Belastungsgeschwindigkeit von 350 mm/s eingesetzt (Gleichung 25). p_0 entspricht dem Atmosphärendruck von 0,1 MPa. Es werden jeweils die Daten in 2 % Verformungsschritten berechnet.

$$M = \left[\sigma_s(\epsilon, 350 \text{ mm/s}) - \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - \frac{0,0055 \frac{g/cm^3}{AskerC} * H - 0,1073 g/cm^3}{0,81 g/cm^3}} \right] * \left[\frac{1}{\sigma_{EVA}(\epsilon, 350 \text{ mm/s})} \right] \quad (25)$$

Über alle getesteten Schäume und Geschwindigkeiten lässt sich ein mittlerer Faktor M von 1,17 % berechnen, sodass sich nachfolgende Formel ergibt (Gleichung 26):

$$\sigma_s(\epsilon, v) = 1,17\% * \sigma_{EVA}(\epsilon, v) + \frac{p_0 * \epsilon}{1 - \epsilon - \frac{0,0055 \frac{g/cm^3}{AskerC} * H - 0,1073 g/cm^3}{0,81 g/cm^3}} \quad (26)$$

Zusammengefasst wird wie folgt vorgegangen: Zur Bestimmung des Gasanteils wird die Härte des Schaums in der Einheit Asker C gemessen. Liegt der Wert außerhalb des Bereichs von 40 bis 70 Asker C, so wird empfohlen, eine andere Härteprüfmethode zu verwenden. Zudem werden die Spannungs-Verformungs-Daten der Matrixphase bei der gewünschten Verformungsgeschwindigkeit in einer servohydraulischen Druckprüfmaschine – wie in Kapitel 4.1 erläutert – gemessen. Für p_0 wird der Atmosphärendruck eingesetzt.

6.3.3 Experimentelle vs. modellierte Daten

Abbildung 89 zeigt exemplarisch für Schaum 3 den experimentell bestimmten und den modellierten Spannungs-Verformungs-Verlauf des Schaummaterials im Vergleich. Zudem

wird ersichtlich, wie sich der modellierte Verlauf aus der berechneten Spannung des Gases und der experimentell bestimmten Spannung der Matrixphase unter Berücksichtigung von Faktor M zusammensetzt.

Im linear-elastischen Bereich dominiert die Matrixphase den σ - ϵ -Verlauf des Schaums. Dieses Überwiegen des Matrixanteils setzt sich im Verlauf weiter fort bis ab 50 % Verformung der Einfluss des in den Zellen komprimierten Gases den σ - ϵ -Verlauf des Schaums dominiert. Deutlich wird dies anhand des Schnittpunktes der beiden Kurvenverläufe von Matrixphase und Gasanteil. Dieses Verhalten deckt sich mit den Aussagen verschiedener Autoren (Mills & Rodriguez-Perez 2001; Mills 2007; Mills et al. 2009; Tordon & Randall 1993). Für Hersteller von Schaummaterialien bedeutet dies, dass durch eine Erhöhung der σ - ϵ -Verhaltens der Matrix im Bereich unterhalb des Kurvenschnittpunktes das Spannungs-Verformungs-Verhalten eines EVA-Schaums stärker zunimmt als durch eine Erhöhung der σ - ϵ -Verhaltens des komprimierten Gases. Im Bereich oberhalb dieses Kurvenschnittpunktes verhält sich der Einfluss der beiden Phasenanteile umgekehrt.

Ouellet et al. (2006) erläuterten den Unterschied des σ - ϵ -Kurvenverlaufs zwischen einem geschlossenzelligen und einem offenzelligen Schaum wie folgt: Bei einem offenzelligen Schaum zeigt die σ - ϵ -Kurve ein horizontales Spannungsplateau auf, wohingegen bei einem geschlossenzelligen Schaum, die σ - ϵ -Kurve im Versagensbereich einen Anstieg aufweist. Da die vorliegenden EVA-Schäumen – wie vorhergehend analysiert – geschlossenzellig sind, zeigt sich der erwartete Kurvenanstieg oberhalb des linear-elastischen Bereiches für die experimentelle σ - ϵ -Kurve. Dieser Kurvenanstieg kann ebenfalls für die modellierte σ - ϵ -Kurve festgestellt werden.

Im Versagensbereich zeigt die σ - ϵ -Kurve des Matrixmaterials einen leichten Anstieg, wohingegen der Kurvenverlauf des in den Zellen eingeschossenen Gases einen deutlich stärkeren Zuwachs aufweist. Dieser dominiert somit den Anstieg der modellierten σ - ϵ -Kurve des Schaums im Versagensbereich. Dieses Verhalten bestätigten Mills et al. (2009), die feststellen konnten, dass der starke Kurvenanstieg der Druckspannung des Schaums zwischen 10 bis 60 % Verformung durch das in den Zellen komprimierte Gas verursacht wird.

Vergleicht man über den gesamten Verformungsbereich die experimentelle mit der modellierten σ - ϵ -Kurve des Schaums, so zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung bis auf den initialen Bereich von rund 10 % Verformung. In diesem Bereich liegt der experimentell ermittelte Kurvenverlauf geringfügig oberhalb der modellierten σ - ϵ -Kurve.

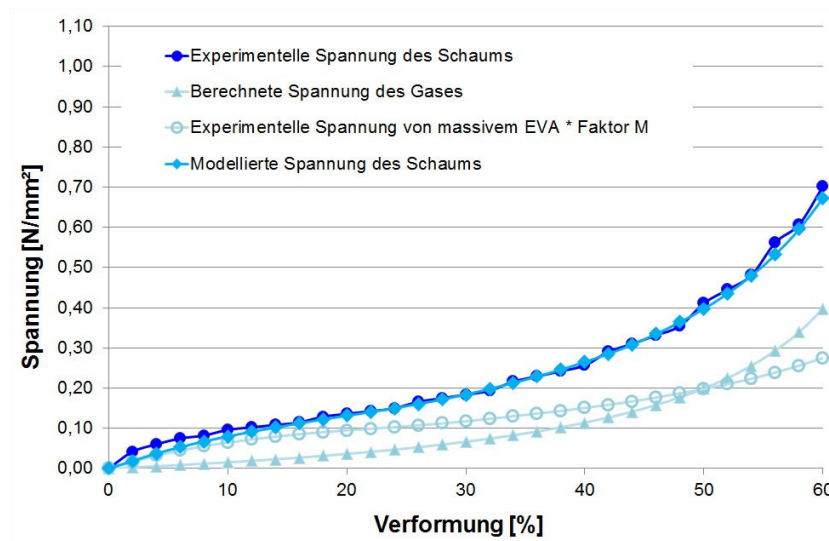


Abbildung 89: σ - ϵ -Kurven von Gasanteil, Matrixphase * Faktor M und experimentell ermitteltem bzw. modelliertem Schaum 3

6.3.3.1 Vergleich bei unterschiedlicher Härte

Für den linear-elastischen Bereich lässt sich ein identischer E-Modul für die unterschiedlichen Schäume ermitteln (Abbildung 90). Dieser liegt bei 0,88 MPa. Es lässt sich folgern, dass der E-Modul unabhängig von der Härte der Schäume ist. Dies bestätigt die experimentellen Ergebnisse in Kapitel 6.1. Des Weiteren bekräftigt dies die Aussagen verschiedener Autoren (Rohde 02.2005 und Viot et al., 2005), die erklärten, dass bei Schäumen aus dem gleichen Matrixmaterial, die Eigenschaften der Matrix den linear-elastischen Bereich dominieren und sich das Verformungsverhalten von Schaummaterialien gleicher Polymerphase, aber unterschiedlicher Härte erst nach Überschreiten des linear-elastischen Bereichs verändert. Im Modell spiegelt sich dieses Verhalten darin wider, dass sich der Gasanteil progressiv verhält und der Matrixanteil eine relativ flachen Kurvenverlauf aufweist. Demzufolge gewinnt der Gasanteil mit zunehmender Verformung an Einfluss. Die Zellgas-komprimierung wird daher erst außerhalb dieses linear-elastischen Bereichs für den Deformationsmechanismus relevant.

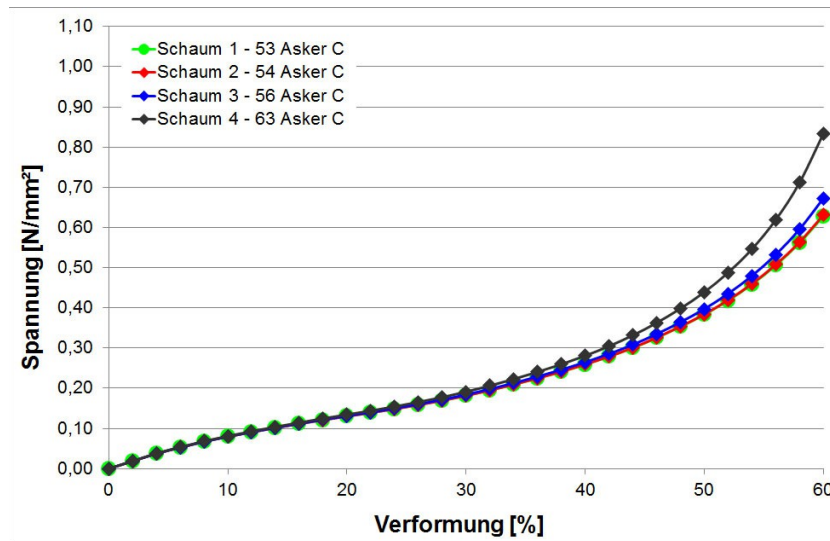


Abbildung 90: Modellierter σ - ϵ -Verlauf der unterschiedlich harten Schäume

Für die Schäume 1, 2 und 3 stimmen experimenteller und modellierter σ - ϵ -Verlauf mit geringer Abweichung im linear-elastischen Bereich sehr gut überein. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass sich diese drei Schäume grundsätzlich nur geringfügig untereinander unterscheiden, was in den vorhergehenden Ergebnissen deutlich wurde. Wie auch für Schaum 3 liegt für Schaum 1 und 2 im linear-elastischen Bereich der experimentelle Verlauf geringfügig über dem modellierten (für Schaum 1 anhand der zwei Kurven mit gefüllten Markierungen in Abbildung 91 ersichtlich). Für Schaum 4 liegt der experimentelle Verlauf im gesamten Verformungsbereich deutlich über dem modellierten.

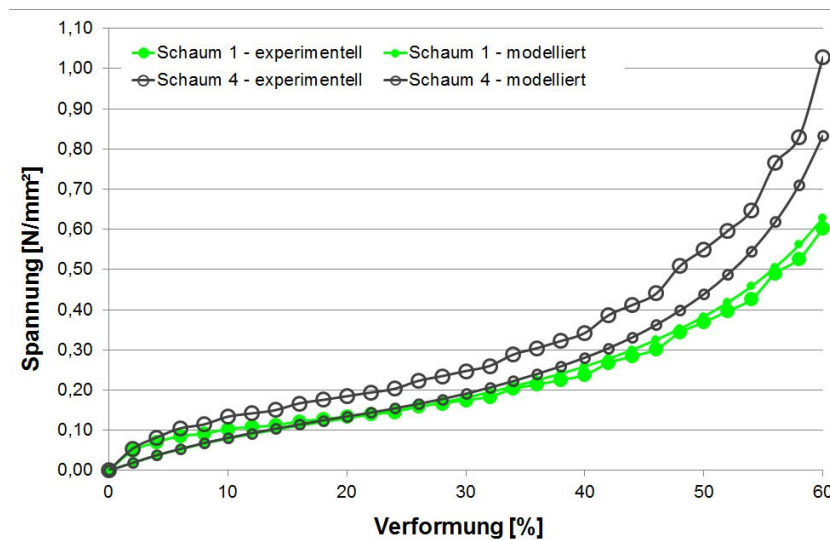


Abbildung 91: Modellierter und experimenteller σ - ϵ -Verlauf von Schaum 1 & 4

6.3.3.2 Vergleich bei unterschiedlicher Verformungsgeschwindigkeit

Abbildung 92 zeigt die modellierten σ - ϵ -Kurven bei unterschiedlicher Geschwindigkeit exemplarisch anhand Schaum 1. Hierbei wird eine Zunahme des E-Moduls mit steigender

Verformungsgeschwindigkeit deutlich ($R = 0,99$). Dieser Zusammenhang wurde ebenso für die vorhergehenden experimentell ermittelten σ - ε -Kurven analysiert. Des Weiteren bestätigt dies die Aussage anderer Autoren (Ouellet et al. 2006; Shariatmadari 2009; Tedesco et al. 1993; Wismans et al.; Zhang et al. 1998).

Im Versagensbereich zeigt sich für die modellieren σ - ε -Kurven ein Anstieg der Spannungswerte mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit (Abbildung 92). Diese Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit konnte auch für die σ - ε -Kurven des Matrixelastomers festgestellt werden (Abbildung 87) und begründet sich in der Verwendung dieser Daten als Matrixanteil im Modell. Für die experimentell ermittelten σ - ε -Kurven der Schäume wurde für die beiden höheren Verformungsgeschwindigkeiten (350 und 950 mm/s) ein identischer σ - ε -Verlauf im Versagensbereich analysiert (Abbildung 88), der allerdings nicht im Modell abgebildet wird. Dieses Verhalten (identischer Verlauf bei höherer Verformung) wurde auch bei Song und Shisheng (2003) bei zwei Verformungsgeschwindigkeiten festgestellt, wohingegen bei fünf anderen untersuchten Verformungsgeschwindigkeiten zunehmende Spannungswerte mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit über den gesamten Verformungsbereich ermitteln lassen. Dies rechtfertigt die Vorgehensweise bei der Modellierung, da nur drei Verformungsgeschwindigkeiten untersucht wurden, was aber zukünftig näher analysiert werden sollte.

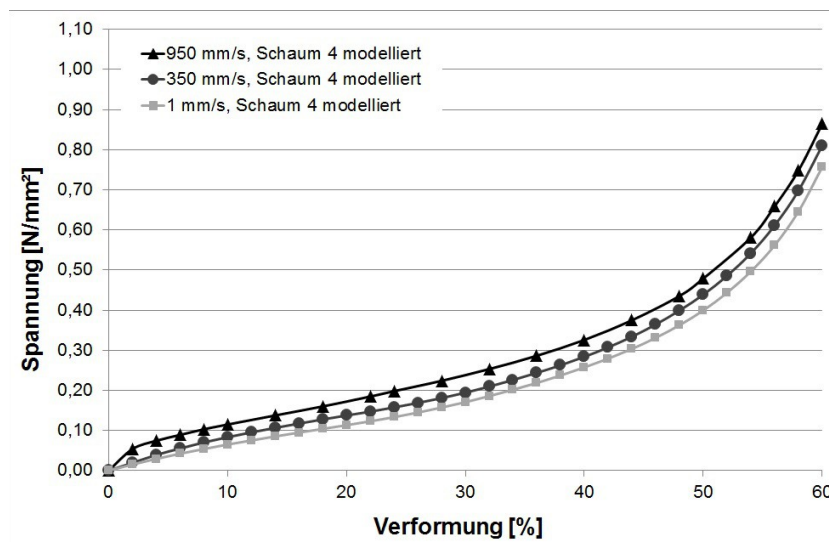


Abbildung 92: Modellierte σ - ε -Kurven bei unterschiedlicher Geschwindigkeit für Schaum 1

Wie schon erwähnt, ergibt sich über alle getesteten Schäume ein mittlerer Faktor M von 1,17 %. Untersucht man die Abhängigkeit von Faktor M zur Verformungsgeschwindigkeit, so lässt sich kein Zusammenhang feststellen ($R = 0,15$). Aus diesem Grund wird der Faktor M auch bei unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten als konstant angenommen, so dass sich die Geschwindigkeitsabhängigkeit in der Matrixphase begründet. Dies bestätigt die

Aussage von Gibson und Ashby (2001).

Es wird darauf hingewiesen, dass für die Datenaufnahme ein Erfassungsintervall (Dauer pro Punkteanzahl) von mindestens 0,1 ms vorgegeben ist, sodass mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit immer weniger Datenpunkte aufgenommen werden konnten.

6.3.3.3 *Qualität des Modells*

Die Qualität des Modells wird anhand der Differenz von experimentell ermittelten zu modellierten Spannungs-Verformungs-Daten der untersuchten Schäume bestimmt. Die Differenz dieser Daten liegt im Mittel bei 7 %. Die Qualität des Modells wird daher als gut eingeschätzt. Es ist demzufolge gut gelungen, ein physikalisches Modell für weichelastischen EVA-Schaumstoffe zu entwickeln, das das Spannungs-Verformungs-Verhalten anwendungsgerecht d.h. unter sportspezifischem Belastungsprofil kennzeichnet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein physikalisches Modell für weichelastische EVA-Schaumstoffe entwickelt, das das mechanische Verformungsverhalten (σ - ϵ -Kurve) bei der Interaktion zwischen Sportler und Sportgerät am Beispiel eines Laufschuhs *anwendungsgerecht* kennzeichnete. Die im Stand der Technik eruierten Einflussfaktoren wurden für die vorliegenden Versuchsmaterialien zunächst überprüft und fanden gegebenenfalls Berücksichtigung im Modell. Dieses Modell setzte sich dabei aus einem Matrix- und einem Gasphasenanteil zusammen. Der Matrixphasenanteil wurde experimentell bei der jeweiligen Prüfgeschwindigkeit bestimmt, wohingegen der Gasphasenanteil auf einem physikalischen Zusammenhang beruhte und anhand der gemessenen Schaumhärte und des Atmosphärendrucks bei der jeweiligen Verformung berechnet wurde. Die Voraussetzungen für die Verwendung des Modells, zu denen inkompressibles Matrixmaterial, Geschlossenzelligkeit und keine Querausdehnung des Schaums zählten, wurden vorab umfangreich abgeprüft. Das Modell wurde an vier unterschiedlich harten Schäumen bei drei unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten überprüft. Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass das gewählte Modell eine gute Übereinstimmung mit den experimentell bestimmten Ergebnissen am Schaummaterial erzielte.

Von den vorliegenden Schaummaterialien zeigten drei der vier Schäume geringe Unterschiede hinsichtlich ihrer Eigenschaften bzw. des σ - ϵ -Verhaltens auf. Dies war der Tatsache geschuldet, dass es sich um Zwischensohlenmaterialien handelte, die im für Laufschuhe typischen Eigenschaftsbereich lagen. Aus diesem Grund ist es zukünftig nötig, das Modell durch die Analyse von EVA-Schäumen eines breiten Eigenschaftsspektrums zu validieren. Zudem stellt sich die Frage, wie sich das Modell auf andere Zwischensohlenschäume übertragen lässt. Diese Schäume wurden in der vorliegenden Arbeit bereits als Vergleichsmaterial verwendet. Ob sich auch für diese und andere Schäume das Modell anwenden lässt, sollte zukünftig eruiert werden.

Zur Beurteilung der zellulären Struktur bzw. der Zellanzahl im Schaum wurde eine neue Methode entwickelt. Dabei wurden die einzelnen Zellen im Schaum an REM-Aufnahmen jeweils mit einem Punkt markiert. Am Graustufen-Punktebild wurde der Weißanteil anhand des Histogramms ermittelt, sodass der Weißanteil die Zellanzahl des Schaums charakterisiert: Je höher der Weißanteil, desto geringer ist die Zellanzahl. Trotzdem ist es nicht gelungen, die vorliegenden Schäume hinsichtlich ihrer zellulären Struktur zu unterscheiden, was sich zum einen im Tomatenscheiben-Prinzip von 2-D-Aufnahmen und zum anderen am geringen Unterschied der vier Schäume untereinander begründete. Es wird erwartet, dass sich der Zelldurchmesser mittels 3-D-Mikro-Computertomographie eindeutig analysieren lässt. Damit könnte zukünftig der postulierte Zusammenhang zum σ - ϵ -Verhalten untersucht und in das

vorhandene Modell integriert werden können.

Hinsichtlich der Matrixphase lässt sich feststellen, dass in dieser Arbeit lediglich Schäume aus einem identischen Matrixmaterial untersucht wurden bzw. zur Verfügung standen. Da insbesondere im Rahmen der Modellgenerierung bestätigt wurde, dass die Eigenschaften des Matrixmaterials den Haupteinfluss auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Schaums im linear-elastischen und im Versagens-Bereich darstellten, sollte durch die gezielte Veränderung des Matrixelastomers dieser Einfluss auf das Modell zukünftig untersucht werden. Des Weiteren wurde für das vorliegende Modell das σ - ϵ -Verhalten bei 1, 350 bzw. 950 mm/s für das Matrixelastomer experimentell bestimmt. In zukünftigen Untersuchungen sollte anhand weiterer Verformungsgeschwindigkeiten die Abhängigkeit analysiert und für das Modell mathematisch formuliert werden. In Kapitel 5.2.2.3 konnte für die σ - ϵ -Kurve des Matrixelastomers mit zunehmender Verformung eine Zunahme des E-Moduls bei ähnlicher Kurvensteigung oberhalb des linear-elastischen Bereichs festgestellt werden. Demzufolge besteht ein weiteres zukünftiges Ziel darin, diesen Zusammenhang anhand weiterer Prüfungsgeschwindigkeiten zu analysieren, um ihn mathematisch zu formulieren und ins Modell zu integrieren.

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

Alley, L.; Nichols, G. (1999): Future technical challenges for PU industry athletic footwear production. March 16 - 18, 1999, Suntec City, Singapore. Shawbury, Shrewsbury: Rapra Technology Ltd. (Book of conference papers - UTECH Asia).

Almanza, O.; Masso-Moreu, Y.; Mills, N. J.; Rodríguez-Pérez, M. A. (2004): Thermal expansion coefficient and bulk modulus of polyethylene closed-cell foams. In: Journal of Polymer Science, Jg. 42, H. 20, S. 3741–3749.

American Foam Group (2011): Polyethylene Closed Cell Foam. Online verfügbar unter <http://www.polyethylenefoam.net/>, zuletzt geprüft am 18.05.2011.

Arsac, A.; Carrot, C.; Guillet, J. (2000): Determination of Primary Relaxation Temperatures and Melting Points of Ethylene Vinyl Acetate Copolymers. In: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Jg. 61, H. 3, S. 681–685.

ASTM D 3576-04, 07.2004: Standard Test Method for Cell Size of Rigid Cellular Plastics.

ASTM F1614-99, 2006: Standard Test Method for Shock Attenuating Properties of Material Systems for Athletic Footwear.

Avalle, M.; Belingardi, G.; Ibba, A. (2007): Mechanical models of cellular solids: Parameters identification from experimental tests. International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures. In: International Journal of Impact Engineering, Jg. 34, H. 1, S. 3–27.

Avalle, M.; Belingardi, G.; Montanini, R. (2001): Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. In: International Journal of Impact Engineering, Jg. 25, H. 5, S. 455–472.

Bludau, C. (2005): Untersuchungen zur hochdynamischen Belastung von Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau, Jg. 100, H. S2, S. 17–20.

Bouix, R.; Viot, P.; Lataillade, J.-L. (2009): Polypropylene foam behaviour under dynamic loadings: Strain rate, density and microstructure effects. In: International Journal of Impact Engineering, Jg. 36, H. 2, S. 329–342.

Boyer, K. A.; Nigg, B. M. (2004): Muscle activity in the leg is tuned in response to impact force characteristics. In: Journal of Biomechanics, Jg. 37, S. 1583–1588.

Brückner, K. (01.2009): Anwendungsbezogene Prüfung von elastischen Kunststoffen am Beispiel von Zwischensohlenmaterialien im Laufschuh. Diplomarbeit. Betreut von S. Odenwald. Chemnitz. Technische Universität Chemnitz, Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik.

Brückner, K.; Odenwald, S. (2009): Hydraulic impact test of EVA midsole materials. Veranstaltung vom 12.-17.Juli 2009. European Polymer Congress, Graz.

Brückner, K.; Odenwald, S.; Schwanitz, S.; Heidenfelder, J.; Milani, T. L. (2010): Polyurethane-foam midsoles in running shoes - impact energy and damping. The Engineering of Sport 8 - Engineering Emotion. In: Procedia Engineering, Jg. 2, H. 2, S. 2789–2793.

Brydon, A. D.; Bardenhagen, S. G.; Miller, E. A.; Seidler, G. T. (2005): Simulation of the densification of real open-celled foam microstructures. In: Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Jg. 53, H. 12, S. 2638–2660.

Bureau, M. N.; Champagne, M. F.; Gendron, R. (2005): Impact-Compression-Morphology Relationship in Polyolefin Foams. In: *Journal of Cellular Plastics*, Jg. 41, H. 1, S. 73–85.

Bureau, M. N.; Gendron, R. (2003): Mechanical-Morphology Relationship of PS Foams. In: *Journal of Cellular Plastics*, Jg. 39, H. 5, S. 353–367.

Bützer, P. (2010): Welche Struktur hat Popcorn. Online verfügbar unter <http://www.buetzer.info/fileadmin/pb/HTML-Files/Popcorn.htm>, zuletzt geprüft am 26.4.2010.

Carré, M. J. (2004): A system for predicting the impact between a ball and a sports surface. Veranstaltung vom 13.-16.09.2004, aus der Reihe "6th International Conference on Sports Engineering". Davis, California.

Dalrymple, T.; Choi, J. (2007): Elastomer Rate-Dependence. A Testing and Material Modeling Methodology. Veranstaltung vom 16.-18.10.2007, aus der Reihe "172nd Technical Meeting of the Rubber Division of the American Chemical Society, Inc.". Cleveland, OH. Online verfügbar unter http://www.axelproducts.com/downloads/Elastomer_Rate_Dependence_Paper.pdf, zuletzt geprüft am 08.02.2011.

Determan, J.; Nevitt, M.; Frederick, E. C. (2009): Measuring the shock attenuation properties of skateboarding shoes. In: *Footwear Science*, Jg. 1, H. 1 supp 1, S. 126–128.

DIN 7726, 05.1982: Schaumstoffe - Begriffe und Einteilung.

DIN 53513, 03.1990: Bestimmung der viskoelastischen Eigenschaften von Elastomeren.

DIN EN ISO 2439, 02.2001: Bestimmung der Härte (Eindruckverfahren).

DIN EN 12503, 07.2001: Sportmatten.

DIN EN ISO 2039-1, 06.2003: Bestimmung der Härte.

DIN EN 1621-2, 08.2003: Motorradschutzkleidung gegen mechanische Belastung - Teil 2.

Vornorm, DIN 15256, 06.2005: Schutzkleidung - Hand, Arm, Bein, Genital und Halsschützer zur Benutzung beim Eishockey - Protektoren für Spieler außer Torwarte.

DIN EN 14120, 09.2007: Schutzkleidung - Handgelenk-, Handflächen-, Knie- und Ellbogenschützer für Benutzer von Rollsportgeräten.

DIN EN 15613, 01.2009: Knie- und Ellbogenschützer für den Hallensport.

DIN EN ISO 845, 06.1995: Bestimmung der Rohdichte.

Dubois, R.; Karande, S.; Wright, D. P.; Martinez, F. (2002): The Use of Ethylene/Styrene Interpolymers in Crosslinked Foams for the Footwear Industry. In: *Journal of Cellular Plastics*, Jg. 38, H. 2, S. 149–161.

Durá, J. V.; García, A. C.; Solaz, J. (2002): Testing shock absorbing materials: the application of viscoelastic linear model. In: *Sports Engineering*, Jg. 5, S. 9–14.

Ehrenstein, G. W. (1999): *Polymer-Werkstoffe. Struktur - Eigenschaften - Anwendung*. 2. Aufl. München: Hanser.

Ehrenstein, G. W.; Riedel, G.; Trawiel, P. (2003): *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen*. 2. Aufl. München: Hanser.

Elliott, J.; Windle, A.; Hobdell, J.; Eeckhaut, G.; Oldman, R.; Ludwig, W. et al. (2002): In-situ deformation of an open-cell flexible polyurethane foam characterised by 3D computed microtomography. In: *Journal of Materials Science*, Jg. 37, H. 8, S. 1547–1555.

Elmoutaouakkil, A.; Fuchs, A.; Bergounhon, P.; Pères, R.; Peyrin, F. (2003): Three-dimensional quantitative analysis of polymer foams from synchrotron radiation x-ray microtomography. In: *Journal of Physics D: Applied Physics*, Jg. 36, H. 10A, S. A37.

- Ferry, J. D. (1980): Viscoelastic properties of polymers. 3. Aufl. New York: Wiley.
- Fischer, F.; Lim, G. T.; Handge, U. A.; Altstädt, V. (2009): Numerical Simulation of Mechanical Properties of Cellular Materials Using Computed Tomography Analysis. In: Journal of Cellular Plastics, Jg. 45, H. 5, S. 441–460.
- Fleming, P. (2011): Sensitivity and relevance of current test methods, aus der Reihe "4th SportSURF workshop". Sheffield, UK. Online verfügbar unter <http://sportsurf.lboro.ac.uk/workshops/4/PF.pdf>, zuletzt geprüft am 01.03.2011.
- Franke, S.; Röhl, T. (2008): Nur einer kann gewinnen. Adidas und Nike kämpfen um die Weltmarktführung. In: Focus, Jg. 32, 2008, S. 104–105.
- Füten, A. (2009): Wittener Stadtmeisterschaften im Turnen, 29.11.2009. Online verfügbar unter <http://www.ruhrnachrichten.de/bilder/fotostrecken/detail/cme35247,1431100>, zuletzt geprüft am 06.01.2012.
- Fuss, F. K. (2009): Collapse stress, strain, rate and timing of closed cell foams: Revealing a conceptual misunderstanding of foam mechanics. Veranstaltung vom 21.-22.09.2009, aus der Reihe "4th Asia-Pacific Congress on Sports Technology APCST". Honolulu, Hawaii.
- Fuss, F. K.; Allgeuer T. (2009): Collapse behaviour of foam shock pads. Veranstaltung vom 21.-22.09.2009, aus der Reihe "4th Asia-Pacific Congress on Sports Technology APCST". Honolulu, Hawaii.
- García, A. C.; Ramiro, J.; Ferrandis, R.; Clement, V.; Alepuz, R.; Vera, P.; Hoyos, J. V. (1992): Dynamic study of footwear materials simulating real loads. Veranstaltung vom 1992, aus der Reihe "10th International Symposium on Biomechanics in Sports".
- Gent, A. N.; Thomas, A. G. (1959): The Deformation of Foamed Elastic Materials. In: Journal of Applied Polymer Science, Jg. 1, H. 1, S. 103–113.
- Gibson, L. J.; Ashby, M. F. (1982): The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Jg. 382, H. 1782, S. 43–59.
- Gibson, L. J.; Ashby, M. F. (2001): Cellular solids. Structure and properties. 2. Aufl. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Godehardt, M.; Schladitz, K.; Sych, T. (2005): Analysis of volume images – a tool for understanding the microstructure of foams. Proceedings of the Symposium on Cellular Metals and Polymers CMaP held October 12-14, 2004, in Fürth, Germany. Singer, R. F.; Körner, C.; Altstädt, V., et al. (Hg.). Zürich: Trans Tech Publications.
- Goods, S. H.; Neuschwanger, N. L.; Henderson, C. C.; Skala, D. M. (1998): Mechanical properties of CRETE, a polyurethane foam. In: Journal of Applied Polymer Science, Jg. 68, H. 7, S. 1045–1055.
- Grellmann, W.; Seidler, S.; Altstädt, V. (2005): Kunststoffprüfung. München: Hanser.
- Heidenfelder, J. (2004): Temperaturabhängigkeit von Zwischensohlenmaterialien in Laufschuhen. Masterarbeit. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Sportwissenschaft & Sportgerätetechnik.
- Heidenfelder, J.; Odenwald, S. (2005): Mechanische Prüfung von Laufschuhen. Veranstaltung vom 19.05.2005, aus der Reihe "DIVERS-Workshop „Wechselwirkung zwischen Materialtechnologie & Bewegungs-Analyse im Sport“". Wien. Veranstalter: DIVERS- Deutsche Interdisziplinäre Vereinigung für Sporttechnologie e.V.
- Heilemann, M.; Sauer, M. (2010): dSTORM Super-Resolution Fluorescence Imaging of Cellular Structures and Dynamics. In: Imaging & Microscopy, Jg. 12, H. 2, 2010, S. 15–17.
- Heinrich Bareiss Prüfgerätebau GmbH: Betriebsanleitung für Handhärteprüfgeräte.

- Hilyard, N. C.; Cunningham, A. (1994): Low density cellular plastics. Physical basis of behaviour. 1. ed. London: Chapman & Hall.
- Hülsmann, K.; Knebel, M. (2009): Hightech-Materialien: Höchstleistung im Sport. In: Kunststoffe, Jg. 1, S. 54–58.
- Iannace, F.; Iannace, S.; Caprino, G.; Nicolais, L. (2001): Prediction of impact properties of polyolefin foams. In: Polymer Testing, Jg. 20, H. 6, S. 643–647.
- Jenkins, M. (2003): Materials in sports equipment. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- Ji, W. S. (2006): Effect of Microstructure of Closed Cell Foam on Strength and Effective Stiffness. Dissertation. Betreut von J. D. Whitcomb. Korea. Hanyang University, Materials Science and Engineering.
- Kammrath & Weiss GmbH (2010): Zug-/Druckmodul bis 5000 N. Online verfügbar unter <http://web2.cylex.de/firma-homepage/http%3A/www.kammrath-weiss.com-1869847.html>, zuletzt geprüft am 27.10.2010.
- Kenesei, P.; Kádár, C.; Rajkovits, Z.; Lendvai, J. (2004): The influence of cell-size distribution on the plastic deformation in metal foams. Viewpoint Set No. 33. Shape Memory Alloys. In: Scripta Materialia, Jg. 50, H. 2, S. 295–300.
- Kleindienst, F. (2003): Graduierung funktioneller Sportschuhparameter am Laufschuh. Dissertation. Deutsche Sporthochschule Köln, Institut für Biomechanik.
- Klempner, D.; Aseeva, R. M. (2004): Handbook of polymeric foams and foam technology. 2. ed. Munich: Hanser.
- Knapik, J. J.; Marshall, S. W.; Lee, R. B.; Darakjy, S. S.; Jones, S. B.; Mitchener, T. A. et al. (2007): Mouthguards in sport activities. History, physical properties and injury prevention effectiveness. In: Sports Med, Jg. 37, H. 2, S. 117–144.
- Kockelmann, H. (2011): ARAMIS - Anwendungen an der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart. Online verfügbar unter http://www.mpa.uni-stuttgart.de/publikationen/mpa_flyer/Flyer-UNI-Aramis-03-web.pdf, zuletzt geprüft am 02.03.2011.
- Krabbe, B. (1994): Mechanical properties of running shoes - measurement and modelling. Veranstaltung vom 18.-20.08.1994, aus der Reihe "8th Biennial Conference". Calgary. Veranstalter: Canadian Society for Biomechanics.
- Krabbe, B. (05.1994): Zur Belastung des Bewegungsapparates beim Laufen. Einfluß von Laufschuh und Lauftechnik. Dissertation. Betreut von Univ.- Prof. Dr. rer. nat. W. Baumann. Köln. Deutsche Sporthochschule, Institut für Biomechanik.
- Kreis, H.; Goldluecke, J. (2009): Analysis of cell structures on polyurethane foams by means of image processing. Veranstaltung vom 31.03.-02.04.2009, aus der Reihe "10th UTECH Europe". Maastricht, Niederlande.
- Kuchling, H. (1999): Taschenbuch der Physik. 16. Aufl.: Fachbuchverlag Leipzig.
- Leppkes, R. (2003): Polyurethane. Werkstoff mit vielen Gesichtern. 5. Aufl. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie.
- Lewis, K. M.; Kijak, I.; Reuter, K. B.; Szabat, J. B. (1996): An Image Analysis Method for Cell-Size and Cell-Size Distribution Measurement in Rigid Foams. In: Journal of Cellular Plastics, Jg. 32, H. 3, S. 235–259.
- Lim, K. S.; Barigou, M. (2004): X-ray micro-computed tomography of cellular food products. In: Food Research International, Jg. 37, H. 10, S. 1001–1012.

- Lin, H.-R. (1997): The Structure and Property Relationships of Commercial Foamed Plastics. In: *Polymer Testing*, Jg. 16, S. 429–443.
- Martínez-Díez, J. A.; Rodríguez-Pérez, M. A.; De Saja, J. A.; Arcos Y Rábago, L. O.; Almanza, O. A. (2001): The Thermal Conductivity of a Polyethylene Foam Block Produced by a Compression Molding Process. In: *Journal of Cellular Plastics*, Jg. 37, H. 1, S. 21–42.
- McNair, P. J.; Marshall, R. N. (1994): Kinematic and kinetic parameters associated with running in different shoes. In: *British Journal of Sports Medicine*, Jg. 28, H. 4, S. 256–260.
- Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberger, E. (2005): *Werkstoffkunde Kunststoffe*. 5. Aufl. München: Hanser.
- Menges, G.; Knipschild, F. (1975): Estimation of mechanical properties for rigid polyurethane foams. In: *Polymer Engineering and Science*, Jg. 15, H. 8, S. 623–627.
- Michler, G. H. (1992): *Kunststoff-Mikromechanik. Morphologie, Deformations- und Bruchmechanismen*. München: Hanser.
- Milani, T. L.; Hennig, E. M. (2002): Biomechanische Testverfahren und Laufschuhforschung. In: *Medizinisch-orthopädische Technik*, H. 3, S. 68–75.
- Mills, N. J. (2007): *Polymer foams handbook. Engineering and biomechanics applications and design guide*. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Mills, N. J.; Fitzgerald, C.; Gilchrist, A.; Verdejo, R. (2003): Polymer foams for personal protection: cushions, shoes and helmets. *Porous Materials*. In: *Composites Science and Technology*, Jg. 63, H. 16, S. 2389–2400.
- Mills, N. J.; Gilchrist, A. (1997a): Creep and Recovery of Polyolefin Foams - Deformation Mechanisms. In: *Journal of Cellular Plastics*, Jg. 33, H. 3, S. 264–292.
- Mills, N. J.; Gilchrist, A. (1997b): The effects of heat transfer and Poisson's ratio on closed-cell polymer foams. In: *Cellular Polymers*, Jg. 16, S. 87–119.
- Mills, N. J.; Rodriguez-Perez, M. A. (2001): Modelling the Gas-loss Creep Mechanism in EVA Foam from Running Shoes. In: *Cellular Polymers*, Jg. 20, H. 2, S. 79–100.
- Mills, N. J.; Stämpfli, R.; Marone, F.; Brühwiler, P. A. (2009): Finite element micromechanics model of impact compression of closed-cell polymer foams. In: *International Journal of Solids and Structures*, Jg. 46, H. 3-4, S. 677–697.
- Mills, N. J.; Zhu, H. X. (1999): The high strain compression of closed-cell polymer foams. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Jg. 47, H. 3, S. 669–695.
- Miyoshi, T.; Itoh, M.; Mukai, T.; Kanahashi, H.; Kohzu, H.; Tanabe, S.; Higashi, K. (1999): Enhancement of energy absorption in a closed-cell aluminum by the modification of cellular structures. In: *Scripta Materialia*, Jg. 41, H. 10, S. 1055–1060.
- MUCOS Korkproduktions GmbH (2010): *Der Werkstoff von dem Füße träumen*. Online verfügbar unter <http://mucos-kork.at/#>, zuletzt geprüft am 26.4.2010.
- Müller, E. (2008): *Formel Fit. Teil 2: Wellness statt Weltrekord*. Online verfügbar unter <http://www.manager-magazin.de/magazin/artikel/0,2828,580624-2,00.html>, zuletzt geprüft am 13.4.2012.
- N24 Gesellschaft für Nachrichten und Zeitgeschehen mbH (2008): *Olympische-Muskeln - Adrenalin und schmelzende Frauenherzen: Bild eines Boxkampfes*, Olympia 24.08.2008. Online verfügbar unter http://www.n24.de/news/newsitem_3719803.html, zuletzt geprüft am 07.01.2012.

- Ouellet, S.; Cronin, D.; Worswick, M. (2006): Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions. In: *Polymer Testing*, Jg. 25, H. 6, S. 731–743.
- proHolz Austria: Holz ist genial (2010). Online verfügbar unter http://www.proholz.at/holzistgenial/inhalt9_2.htm, zuletzt geprüft am 27.4.2010.
- Ramsteiner, F.; Fell, N.; Forster, S. (2001): Testing the deformation behaviour of polymer foams. In: *Polymer Testing*, Jg. 20, H. 6, S. 661–670.
- Retting, W.; Laun, H. M. (1991): *Kunststoff-Physik*. München: Hanser.
- Ridha, M.; Shim, V. (2008): Microstructure and Tensile Mechanical Properties of Anisotropic Rigid Polyurethane Foam. In: *Experimental Mechanics*, Jg. 48, H. 6, S. 763–776.
- Rodríguez-Pérez, M. A.; Alonso, O.; Duijsens, A.; De Saja, J. A. (1998): Thermal expansion of crosslinked closed-cell polyethylene foams. In: *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Jg. 36, H. 14, S. 2587–2596.
- Rodríguez-Pérez, M. A.; De Saja, J. A. (2000): Dynamic mechanical analysis applied to the characterisation of closed cell polyolefin foams. In: *Polymer Testing*, Jg. 19, H. 7, S. 831–848.
- Rodríguez-Pérez, M. A.; Rodríguez-Llorente, S.; De Saja, J. A. (1997): Dynamic mechanical properties of polyolefin foams studied by DMA techniques. In: *Polymer Engineering & Science*, Jg. 37, H. 6, S. 959–965.
- Rodríguez-Pérez, M. A.; Velasco, J. I.; Arencón, D.; Almanza, O.; De Saja, J. A. (2000): Mechanical characterization of closed-cell polyolefin foams. In: *Journal of Applied Polymer Science*, Jg. 75, H. 1, S. 156–166.
- Rohde, S. (02.2005): *Mechanische Eigenschaften metallischer und polymerer Schaumstoffe*. Dissertation. Betreut von Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer. Kassel. Universität, Fachbereich Maschinenbau. Online verfügbar unter http://www.shaker.de/Online-Gesamtkatalog-Download/2010.04.01-13.46.23-134.109.65.150-radBCD5B.tmp/3-8322-4577-4_INH.PDF, zuletzt geprüft am 01.04.2010.
- Röthemeyer, F.; Sommer, F. (2006): *Kautschuk-Technologie. Werkstoffe, Verarbeitung, Produkte*. 2., überarb. Aufl. München: Hanser.
- Roux, S.; Hild, F.; Viot, P.; Bernard, D. (2008): Three-dimensional image correlation from X-ray computed tomography of solid foam. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 39, H. 8, S. 1253–1265.
- Rush, K. C. (1969): Load-compression behavior of flexible foams. In: *Journal of Applied Science*, Jg. 13, S. 2297–2311.
- Rush, K. C. (1970a): Energy-absorbing characteristics of foamed polymers. In: *Journal of Applied Polymer Science*, Jg. 14, S. 1133–1147.
- Rush, K. C. (1970b): Load-compression behavior of brittle foams. In: *Journal of Applied Polymer Science*, Jg. 14, S. 1263–1273.
- Saha, M. C.; Mahfuz, H.; Chakravarty, U. K.; Uddin, M.; Kabir, Md E.; Jeelani, S. (2005): Effect of density, microstructure, and strain rate on compression behavior of polymeric foams. In: *Materials Science and Engineering*, Jg. 406, H. 1-2, S. 328–336.
- Schnetger, J. (2004): *Lexikon Kautschuktechnik*. 3. Aufl. Heidelberg: Hüthig.
- Schwanitz, S.; Möser, S.; Odenwald, S. (2010): Comparison of test methods to quantify shock attenuating properties of athletic footwear. *The Engineering of Sport 8 - Engineering Emotion*. In: *Procedia Engineering*, Jg. 2, H. 2, S. 2805–2810.

- Shariatmadari, M. R. (2009): Finite Element Analysis into the Foot — Footwear Interaction Using EVA Footwear Foams. In: Lim, Chwee Teck; Goh, James C. H. (Hg.): 13th International Conference on Biomedical Engineering: Springer Berlin Heidelberg (IFMBE Proceedings), Bd. 23, S. 1627–1630.
- Shih, R.-S.; Kuo, S.-W.; Chang, F.-C (2011): Thermal and mechanical properties of microcellular thermoplastic SBS/PS/SBR blend: effect of crosslinking. In: Polymer, Jg. 52, H. 3, S. 752–759.
- Sims, G. L. A.; Khunniteekool, C. (1994): Cell size measurement of polymeric foams. In: Cellular Polymers, Jg. 13, H. 2, S. 137–146.
- Skochdopole, R. E.; Rubens, L. C. (1965): Physical Property Modifications of Low-Density Polyethylene Foams. In: Journal of Cellular Plastics, Jg. 1, H. 1, S. 91–96. O
- Solorzano, E.; Rodriguez-Perez, M. A.; Valtuille, E.; De Saja, J. A. (2007): Consequences of the barrel effect in foams tested under impact conditions: Stress correction by image analysis. In: Polymer Testing, Jg. 26, H. 7, S. 846–854.
- Song, L.; Shisheng, H. (2003): Testing the Compressive Property of EVA Foam at High Strain Rate. Veranstaltung von 2003, aus der Reihe "SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics". Online verfügbar unter <http://sem-proceedings.com/03s/sem.org-2003-SEM-Ann-Conf-s29p05-Testing-Compressive-Property-EVA-Foam-High-Strain-Rate.pdf>, zuletzt geprüft am 10.02.2011.
- Stefanyshyn, D. J.; Nigg, B. M. (2003): Energy and Performance Aspects in Sport Surfaces. Veranstaltung vom 01.08.2003, aus der Reihe "3rd Symposium on Sport Surfaces". Calgary. Veranstalter: International Association for Sports Surface Sciences. Online verfügbar unter http://www.iss-sportsurfacescience.org/downloads/documents/8P0VK79N7A_Nigg_EnergyandPerform.pdf, zuletzt geprüft am 24.06.2010.
- Stenglein, M. (2009): Der Laufschuh-Berater. Online verfügbar unter <http://www.menshealth.de/fitness/ausruestung/der-optimale-laufschuh-fuer-ihren-typ.603.htm>, zuletzt geprüft am 02.1.2012.
- Tedesco, J. W.; Ross, C. A.; Kuennen, S. T. (1993): Strain Rate Effects on the Compressive Strength of Shock-Mitigating Foams. In: Journal of Sound and Vibration, Jg. 165, H. 2, S. 376–384.
- Tordon, M. J.; Randall, R. B. (1993): Evaluation of the cushioning of closed-cell plastic foams. Preprints of papers. Veranstaltung vom 9-11.02.1993, aus der Reihe "Dynamic loading in manufacturing and service". Melbourne, Victoria, Australia.
- Trepte, A. (2006): Ultrascharfes Lichtmikroskop entschlüsselt grundlegende Mechanismen der Nervenkommunikation. Max-Planck-Gesellschaft. Online verfügbar unter http://www.innovations-report.de/html/berichte/physik_astronomie/bericht-57996.html, zuletzt aktualisiert am 18.04.2006, zuletzt geprüft am 01.07.2010.
- Uhlig, K. (2006): Polyurethan-Taschenbuch. 3. Aufl. München: Hanser.
- Vaitkus, S.; Laukaitis, A.; Gnipas, I.; Kersulis, V.; Vejelis, S. (2006): Experimental Analysis of Structure and Deformation Mechanisms of Expanded Polystyrene (EPS) Slabs. In: Material Science, Jg. 12, H. 4, S. 323–327.
- Veltins- Sportstudie 2001. Herausgegeben von D.S.B. und VELTINS (Brauerei C. & A. VELTINS GmbH). Online verfügbar unter http://www.hockey.de/VVI-web/Vereinshilfe/BAY/Bilder/veltins_studie_2_47f138e9-1.pdf, zuletzt geprüft am 30.12.2011.

- Verdejo, R. (10.2003): Gas loss and durability of EVA foams used in running shoes. Thesis. Betreut von Dr. Nigel Mills. Birmingham. University of Birmingham, School of Engineering / Metallurgy and Materials. Online verfügbar unter <http://etheses.bham.ac.uk/231/1/Verdejo04PhD.pdf>, zuletzt geprüft am 05.05.2010.
- Verdejo, R.; Mills, N. J. (2002): Performance of EVA foam in running shoes. In: *The Engineering of Sport*, Jg. 2, H. 4, S. 580–587.
- Verdejo, R.; Mills, N. J. (2004a): Heel-shoe interactions and the durability of EVA foam running-shoe midsoles. In: *Journal of Biomechanics*, Jg. 37, H. 9, S. 1379–1386.
- Verdejo, R.; Mills, N. J. (2004b): Simulating the effects of long distance running on shoe midsole foam. In: *Polymer Testing*, Jg. 23, H. 5, S. 567–574.
- Viot, P.; Beani, F.; Lataillade, J. -L. (2005): Polymeric foam behavior under dynamic compressive loading. In: *Journal of Materials Science*, Jg. 40, H. 22, S. 5829–5837.
- Wanke, K. (1993): *Handbuch Federn. Berechnung und Gestaltung im Maschinen- und Gerätebau*. 2. Aufl. Berlin: Verlag Technik.
- Weaire, D.; Fortes, M. A. (1994): Stress and strain in liquid and solid foams. In: *Advances in Physics*, Jg. 43, H. 6, S. 685–738.
- Westermann, B.; Stringfellow, P. M.; Eccleston, J. A. (2002a): Beneficial effects of air inclusions on the performance of ethylene vinyl acetate (EVA) mouthguard material. In: *Br J Sports Med*, Jg. 36, H. 1, S. 51–53.
- Westermann, B.; Stringfellow, P. M.; Eccleston, J. A.; Harbrow, D. J. (2002b): Effect of ethylene vinyl acetate (EVA) closed cell foam on transmitted forces in mouthguard material. In: *British Journal of Sports Medicine*, Jg. 36, H. 3, S. 205–208.
- Wismans, J. G. F.; Vries, D. de; van Dommelen, J. A. W.; Govaert, L. E.: Strain-rate dependence of polymer foams. Experiments and simulations (2011). Online verfügbar unter <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/11062.pdf>, zuletzt geprüft am 22.02.2011.
- Yick, K.-I.; Wu, L.; Yip, J.; Ng, S.-P.; Yu, W. (2010): Study of thermal-mechanical properties of polyurethane foam and the three-dimensional shape of molded bra cups. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Jg. 210, H. 1, S. 116–121.
- Zhang, J.; Kikuchi, N.; Li, V.; Yee, A.; Nusholtz, G. (1998): Constitutive modeling of polymeric foam material subjected to dynamic crash loading. In: *International Journal of Impact Engineering*, Jg. 21, H. 5, S. 369–386.
- Zhang, L.; Jeon, H. K.; Malsam, J.; Herrington, R.; Macosko, C. W. (2007): Substituting soybean oil-based polyol into polyurethane flexible foams. In: *Polymer*, Jg. 48, H. 22, S. 6656–6667.

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Impulsartige Stoßbelastungen auf ein Sportgerät: Schlag auf Protektoren beim Boxen, Landung einer Turnerin auf einer Weichbodenmatte und beim Auftreffen des Rückfußes eines Läufers auf den Laufschuh (N24 Gesellschaft für Nachrichten und Zeitgeschehen mbH, 2008; Füten, A., 2009; Stenglein, 2009).....	1
Abbildung 2: REM-Aufnahmen natürlicher Schäume links: Popcorn (Bützer, 2010); mittig: Fichte (proHolz Austria, 2010); rechts: Kork (MUCOS Korkproduktions GmbH, 2010).....	2
Abbildung 3: Strukturformel EVA.....	3
Abbildung 4: REM-Aufnahme eines EVA-Schaums.....	3
Abbildung 5: REM-Aufnahme eines PUR-Weichschaums (Bildnachweis: BASF Polyurethanes GmbH, Lemförde).....	4
Abbildung 6: Sportanwendungstypische Bereiche der kinetischen Energie (Carré, 2004).....	7
Abbildung 7: Schematische σ - ϵ -Verhalten eines Polymerschaums (Verdejo, 10.2003).....	8
Abbildung 8: σ - ϵ -Kurve eines EPP-Schaums mit modellierter Kurve (Avalle et al., 2007).....	9
Abbildung 9: Kelvin-Voigt-Modell.....	10
Abbildung 10: Tetrakaidekaeder (Almanza et al., 2004).....	10
Abbildung 11: Experimenteller und modellierter σ - ϵ -Verlauf eines LDPE-Schaums (Mills & Zhu, 1999).....	11
Abbildung 12: Modell nach Gent und Thomas (1959).....	11
Abbildung 13: Einheitszelle eines geschlossenzelligen Schaums (Gibson & Ashby, 2001)...	12
Abbildung 14: Vergleich der experimentellen und simulierten Ergebnisse des Kompressionsmoduls (Fischer et al., 2009).....	13
Abbildung 15: Prinzip einer Luftfeder und deren Federkennlinie (Wanke, 1993).....	14
Abbildung 16: Gasvolumen in einem Schaum vor und nach uniaxialer Druckbelastung (Mills et al., 2003).....	14
Abbildung 17: Verformungsverhalten eines EVA-Schaums mit Anteilen von isotherm komprimierter Luft und EVA (Tordon & Randall, 1993).....	16
Abbildung 18: σ - ϵ -Kurven von geschlossenzelligen LDPE-Schäumen (Gibson & Ashby, 2001).....	17
Abbildung 19: σ - ϵ -Kurven nach Subtraktion des Gasanteils (Gibson & Ashby, 2001).....	17
Abbildung 20: links: Modell der drei kombinierten Elemente vor und nach Knicken; rechts: 2-D-Schaumstruktur (Fuss, 2009).....	17
Abbildung 21: σ - ϵ -Kurven eines Schaums unterschiedlicher Dichte (Avalle et al., 2001).....	22
Abbildung 22: σ - ϵ -Kurven für geschäumtes PP unterschiedlicher Schaumdichte (Bouix et al., 2009).....	22

Abbildung 23: Härtemessgerät (Röthemeyer & Sommer, 2006).....	23
Abbildung 24: Schematische Darstellung der Härtemessung (Gibson & Ashby, 2001).....	23
Abbildung 25: Analyse eines EVA-Schaums mittels PORE!SCAN.....	25
Abbildung 26: Analyse einer porösen Struktur mittels 3-D-Mikro-CT (Lim & Barigou, 2004).	26
Abbildung 27: Vergleich REM und Mikro-CT (Fischer et al., 2009).....	27
Abbildung 28: σ - ϵ -Kurven zweier PE-Schäume ähnlicher Dichte, aber unterschiedlicher Zellgröße (Skochdopole & Rubens, 1965).....	28
Abbildung 29: Zusammenhang von Gefügeparameter und Versagensspannung, $v = 2,5 \text{ mm/s}$ (Bureau & Gendron, 2003).....	28
Abbildung 30: REM-Aufnahmen von PVC-Schäumen unterschiedlicher Mikrostruktur; links: kleinzelliger Schaum HD130, rechts: großzelliger Schaum H130 (Saha et al., 2005).....	29
Abbildung 31: σ - ϵ -Kurven zweier PP-Schäume gleicher Dichte, aber unterschiedlicher Zellgröße; foam A: großzellig, foam B: kleinzellig (Bouix et al., 2009).....	29
Abbildung 32: Zusammenhang von Schaumdichte und mittlerem PS-Partikeldurchmesser (Vaitkus et al., 2006).....	30
Abbildung 33: a: Offene Zelle; b: Geschlossene Zelle (Klempner & Aseeva, 2004).....	30
Abbildung 34: Luftbläschen-Austritt bei quasi-statischer Verformung von EPS bei 40 % Deformation (Bouix et al., 2009).....	31
Abbildung 35: Kompressionskurven für PE-Schaum unterschiedlicher Zelligkeit (Skochdopole & Rubens, 1965)	31
Abbildung 36: Schematische Darstellung der Verformung eines Schaums (Kleindienst, 2003)	32
Abbildung 37: Poissonzahl in Abhängigkeit von der Verformung (Solorzano et al., 2007).....	33
Abbildung 38: Bande von kollabierten Strohhalmen (Weaire & Fortes, 1994).....	34
Abbildung 39: Inhomogener Deformationsprozess von PS-Schaum (Ramsteiner et al., 2001)	34
Abbildung 40: μ -CT-Aufnahmen einer Druckverformung, Belastungsrichtung horizontal (Ridha & Shim, 2008).....	35
Abbildung 41: 4 % Verformung (Elliott et al., 2002).....	36
Abbildung 42: 10 % Verformung (Elliott et al., 2002).....	36
Abbildung 43: 23 % Verformung (Elliott et al., 2002).....	36
Abbildung 44: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines PUR-Elastomers (Ehrenstein, 1999)	39
Abbildung 45: Verlauf von Speichermodul M' , Verlustmodul M'' und Verlustfaktor d eines Polymerschaums bei einer Frequenz von 1 Hz.....	41
Abbildung 46: Spannungs-Verformungs-Verhalten eines Elastomers in Abhängigkeit von der	

Verformungsgeschwindigkeit (Dalrymple & Choi, 2007).....	42
Abbildung 47: σ - ϵ -Kurven eines EPS-Schaums ($\rho = 0,112 \text{ g/cm}^3$) in Abhängigkeit von der Verformungsrate (Ouellet et al., 2006).....	42
Abbildung 48: a) σ - ϵ -Kurven in Abhängigkeit von der Verformungsrate; b) Verformungsratenabhängigkeit der Versagensspannung von PUR-Schäumen unterschiedlicher Dichte (Wismans et al., 2011).....	43
Abbildung 49: σ - ϵ -Kurven eines EVA-Schaums bei unterschiedlicher Verformungsgeschwindigkeit (Song & Shisheng, 2003).....	43
Abbildung 50: EVA-Zwischensohlenmaterial in Puma Complete Running Schuh (Bildnachweis: Puma AG, Herzogenaurach).....	48
Abbildung 51: Werkzeug mit vorgeformten Rohling (Bildnachweis: Puma AG, Herzogenaurach).....	48
Abbildung 52: Schema: Veränderung an den Schaumaußenseiten.....	51
Abbildung 53: Schema: Veränderung Zelldurchmesser und Zellwanddicke.....	51
Abbildung 54: Schema: Veränderung Zellanzahl.....	51
Abbildung 55: Ursprüngliche REM-Aufnahme	53
Abbildung 56: REM-Aufnahme mit entsprechenden Punkten pro Zelle.....	53
Abbildung 57: Bestimmung des Weißanteils.....	53
Abbildung 58: „Verformungsapparatur“ zur μ -CT-Analyse.....	54
Abbildung 59: σ - ϵ -Verhalten der unterschiedlichen EVA-Schäume bei 350 mm/s Prüfgeschwindigkeit.....	58
Abbildung 60: Energieeintrag [J] bei 350 mm/s Verformungsgeschwindigkeit.....	59
Abbildung 61: Dichten der untersuchten Schäume [g/cm^3].....	60
Abbildung 62: Härte der untersuchten Schäume.....	61
Abbildung 63: Kraft, um Schaummaterialien um 45 % zu deformieren.....	61
Abbildung 64: Weißanteil [%] der lichtmikroskopischen Aufnahmen.....	62
Abbildung 65: Verteilungen der Zelldurchmesser [μm] der mittels PORE!SCAN-Verfahren untersuchten Schäume.....	62
Abbildung 66: Schaum 1.....	63
Abbildung 67: Zelldurchmesser der unterschiedlichen Schäume.....	63
Abbildung 68: Vergleich von 2-D- und 3-D-Verfahren.....	64
Abbildung 69: Weißanteil des Punktbildes zur Charakterisierung der Zellanzahl.....	64
Abbildung 70: EVA-Schaum unter Druckverformung in Wasser.....	65
Abbildung 71: PUR-Schaum unter Druckverformung in Wasser.....	65
Abbildung 72: Über die Zykluszahl konstante Masse des EVAs und zunehmende Masse des PURs.....	65

Abbildung 73: Schaum in Ausgangslage.....	66
Abbildung 74: Deformierter Schaum	66
Abbildung 75: Verformungsverteilung bei 40 % Verformung.....	66
Abbildung 76: Poissonzahl bei unterschiedlichen Verformungen (3-D μ -CT).....	66
Abbildung 77: Ausgangsposition.....	67
Abbildung 78: Schaum 2 bei $\epsilon = 10\%$	67
Abbildung 79: Schaum 2 bei $\epsilon = 30\%$	67
Abbildung 80: Schaum 2 bei $\epsilon = 50\%$	67
Abbildung 81: Verformungsanalyse mittels Grauwertkorrelation; Belastungsrichtung vertikal	67
Abbildung 82: Analyse des Korrelationskoeffizienten; Druckverformung in vertikaler Richtung	68
Abbildung 83: Probekörper vor (links) und nach (rechts) der Belastung.....	69
Abbildung 84: σ - ϵ -Verhalten des massiven Elastomers; drei Probekörper.....	69
Abbildung 85: Extinktionsspektren der vier EVA-Schäume und des massiven Elastomers (as: asymmetrisch; s: symmetrisch.....	70
Abbildung 86: Verlustfaktor der untersuchten Schäume.....	70
Abbildung 87: σ - ϵ -Verhalten des massiven Elastomers in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit; je drei Probekörper.....	71
Abbildung 88: σ - ϵ -Kurven für Schaum 4 bei unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten.....	72
Abbildung 89: σ - ϵ -Kurven von Gasanteil, Matrixphase * Faktor M und experimentell ermitteltem bzw. modelliertem Schaum 3.....	83
Abbildung 90: Modellierter σ - ϵ -Verlauf der unterschiedlich harten Schäume.....	84
Abbildung 91: Modellierter und experimenteller σ - ϵ -Verlauf von Schaum 1 & 4.....	84
Abbildung 92: Modellierte σ - ϵ -Kurven bei unterschiedlicher Geschwindigkeit für Schaum 1.....	85

9 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich bei allen bedanken, die mich bei meinem Promotionsstudium unterstützten:

Besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Odenwald für das interessante Promotionsthema und die Möglichkeit der wissenschaftlichen Mitarbeit an seiner Professur. Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr. Thomas L. Milani von der Professur Bewegungswissenschaft dafür, dass ich im Rahmen der interdisziplinären Arbeitsgruppe an Laufschuhen forschen durfte. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde von der Professur Kunststoffe danke ich für die Übernahme der Zweitkorrektur sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Mennig für die kreativen Gespräche und Anregungen.

Danken möchte ich Herrn Matthias Hartmann und Herrn Reinhold Sussmann von der Puma AG, Herzogenaurach für die freundliche Bereitstellung der Versuchsmaterialien. Ebenso danke ich Herrn Dr. Frank Wilco Bartels, Herrn Dr. André Kamm und Herrn Steffen Meyer von der BASF Polyurethanes GmbH, Lemförde für die Praktikumsmöglichkeit im Rahmen der Forschungskooperation, sowie die Bereitstellung von Schaummaterialien. Ein großer Dank geht an Herrn Rocco Sickel von der Professur Kunststoffe der Technischen Universität Chemnitz für die Analysen mittels DMA und FTIR-Spektrometer. Ebenso danke ich Herrn Dr. Wolfgang Faust vom Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS, Chemnitz für die Aufnahmen mittels 3-D-Mikro-Computertomographie und Frau Seiler von der Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH für die Unterstützung mittels Grauwertkorrelations-Software VED-DAC. Mein Dank gilt Herrn Dr. Harry Podlesak und Frau Uta Faust von der Professur Verbundwerkstoffe der TU Chemnitz für die Aufnahmen mittels Rasterelektronenmikroskopie und Frau Corinna Kuprin von der Professur Werkstofftechnik für die 2D-Verformungsanalyse. Diese Gelegenheit möchte ich ebenfalls nutzen, um den Kollegen der Professuren Sportgerätetechnik und Bewegungswissenschaft für die interessanten Diskussionen, die Unterstützung bei den statistischen Auswertungen, die Probenpräparationen und die „Bastelarbeiten“ zu danken.

Für die Durchsicht dieser Arbeit danke ich Vanessa Richter und Anita Schöppner.

Abschließend danke ich der Hanns-Seidel-Stiftung sowohl für die finanzielle als auch ideelle Unterstützung meiner Promotion und meinem Vertrauensdozenten Herrn Prof. Dr. Eckhard Jesse und der HSS-Stipendiatengruppe für die abwechslungsreichen Gruppentreffen in und um Chemnitz.

Die Promotion wurde durch ein Begabtenstipendium der Hanns-Seidel-Stiftung aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

10 Selbstständigkeitserklärung nach §8

Vorname: Karoline
Nachname: Brückner
geboren am: 17. Juli 1980
Matrikel: 229094

Ich erkläre gegenüber der Technischen Universität Chemnitz, dass die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe sowie ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde und dass aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommene Gedanken in der Arbeit als solche kenntlich gemacht sind.

Ich versichere, dass ich in Kapitel 9 die Personen nannte, von denen ich bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes Unterstützungsleistungen erhalten habe. Des Weiteren versichere ich, dass neben den in Kapitel 9 genannten keine weitere Personen bei der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren, insbesondere auch nicht die Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen wurde, und dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Diese Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zwecke einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt. Es fanden keine früheren erfolglose Promotionsversuche statt.

Hiermit teile ich mit, dass ich mit einer elektronischen Überprüfung meiner Dissertation auf etwaige Plagiate hin einverstanden bin.

Datum: _____

Unterschrift: _____

11 Curriculum Vitae

Zur Person

Vorname:	Karoline
Nachname:	Brückner
geboren am:	17. Juli 1980
Geburtsort:	Würzburg
Staatsangehörigkeit:	deutsch

Hochschulausbildung

seit 04/2009	Promotionsstudium an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz Stipendiatin der Promotionsförderung der Hanns-Seidel-Stiftung
04/2007 – 01/2009	Aufbaustudium Maschinenbau/Produktionstechnik an der Technischen Universität Chemnitz
10/2000 – 06/2005	Kunststofftechnik-Studium an der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt Stipendiatin der Fachhochschulförderung der Hanns-Seidel-Stiftung

Beruflicher Werdegang

seit 09/2012	Entwicklungsingenieurin der ITW Automotive Products GmbH Body, Interior & Fuel Components, Röttingen
06/2011 – 08/2012	Entwicklungsingenieurin in der Unit Forschung & Entwicklung Orthopädie der medi GmbH & Co. KG, Bayreuth
08/2006 – 05/2011	Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Professur für Sportgerätetechnik der Technischen Universität Chemnitz
10/2005 – 07/2006	Projektmanagerin im Bereich Automotive der Wirthwein AG, Creglingen